



Pneumatisk frakturering

Dokumentation af pilotforsøg Vadsbyvej 16A, Hedehusene. Københavns Amt

Riis, C.; Christensen, A.G.; Bjerg, Poul Løgstrup; Christensen, Stine Brok; Broholm, Mette Martina; Scheutz, Charlotte

Publication date:
2006

Document Version
Publisher's PDF, also known as Version of record

[Link back to DTU Orbit](#)

Citation (APA):

Riis, C., Christensen, A. G., Bjerg, P. L., Christensen, S. B., Broholm, M. M., & Scheutz, C. (2006). *Pneumatisk frakturering: Dokumentation af pilotforsøg Vadsbyvej 16A, Hedehusene. Københavns Amt*. Niras.
http://www.er.dtu.dk/publications/fulltext/2006/MR2006-088_hovedrapport.pdf

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Københavns Amt

Pneumatisk frakturering

Dokumentation af pilotforsøg
Vadsbyvej 16A, Hedehusene

Maj 2006



**Rådgivende ingeniører
og planlæggere A/S**

NIRAS
Sortemosevej 2
DK-3450 Allerød

Telefon 4810 4200
Telefax 4810 4300
E-mail niras@niras.dk
Web www.niras.dk

CVR-nr. 37295728
Tilsluttet F.R.I

Udgave nr.:
Endelig

Dato:
18. maj 2006

Forfattere:
Charlotte Riis og Anders G. Christensen, NIRAS

Poul L. Bjerg, Stine Brok Christensen, Mette Broholm og Charlotte Scheutz, Institut for Miljø & Ressourcer,
DTU

Kvalitetskontrol:
Charlotte Riis og Anders G. Christensen, NIRAS

Poul L. Bjerg, Stine Brok Christensen, Mette Broholm og Charlotte Scheutz, Institut for Miljø & Ressourcer,
DTU

Godkendt af:
Erling V. Fischer/EVF

Sag nr. og filnavn:
I:\SAG\03\792.04\Rap\Moræneler\Pneumatisk frakturering ML-rap_cer-endelig.doc

Indhold

1	INDLEDNING	3
2	BAGGRUND OG FORMÅL	5
2.1	BAGGRUND	5
2.1.1	Lokaliteten	6
2.2	FORMÅL	7
3	STRATEGI	9
3.1	PRINCIPBESKRIVELSE AF PNEUMATISK FRAKTURERING	9
3.1.1	Udførelse af pilotforsøg	10
3.2	DOKUMENTATION AF PNEUMATISK FRAKTURERING	10
3.2.1	Tracerblanding	11
3.2.2	Feltobservationer	12
3.2.3	Genfinding af tracere	12
4	FORUNDERSØGELSER MED FLUORESCERENDE TRACERE	15
4.1	OPSKÆRING AF KERNEPRØVER	15
4.2	BELYSNING OG FOTOGRAFERING	15
4.3	FFD-SONDE	16
4.4	ANALYSE AF VANDPRØVER	17
4.5	ANALYSE AF JORDPRØVER	17
4.6	VURDERING AF TRACERKONCENTRATION OG SAMMENSÆTNING	17
5	FELTAKTIVITETER	21
5.1	FORBEREDENDE FELTAKTIVITETER	21
5.2	PILOTFORSØG – FELTAKTIVITETER	23
5.2.1	Pneumatisk frakturering	23
5.2.2	Feltobservationer under frakturering	25
5.2.3	Genfinding af tracere	27
6	RESULTATER	31
6.1	LOKALITETEN	31
6.1.1	Geotekniske egenskaber	31
6.1.2	Naturlige sprækker	34
6.1.3	Opsummering	35
6.2	FRAKTURERING	36
6.2.1	Observationer under frakturering	36
6.2.2	Målinger af jordhævning og -sætning	42
6.2.3	FFD-sonderinger	43

6.2.4	Kerner	45
6.2.5	Jordprøver fra M1-M6	48
6.2.6	Vandprøver i traditionelle filtre (M- og T-boringer)	50
6.2.7	Vandprøver fra sugeceller	52
6.2.8	Udgravning	54
7	PRAKTISKE ASPEKTER	57
8	DISKUSSION	61
8.1	DOKUMENTATIONSMETODER	61
8.1.1	Dokumentationsmetoder under frakturering	61
8.1.2	Sammenligning mellem dokumentationsmetoder efter frakturering	61
8.1.3	Sammenhæng mellem jordkoncentrationer og vandkoncentrationer	65
8.1.4	Prøvetagningsmetode, skala og detektion	67
8.1.5	Evaluering af de enkelte metoder	69
8.2	TRACERE	70
8.3	SPRÆKKEUDBREDELSE	73
8.3.1	Overordnet tendens for fordeling af tracer	73
8.3.2	Observeret tracerforekomst og vurderet sprækkeudbredelse	74
8.3.3	Typer af tracerforekomst	81
8.3.4	Hypoteser om sprækkedannelse	82
8.3.5	Massebalance	83
8.3.6	Samlet vurdering	85
9	KONKLUSION	87
10	PERSPEKTIVERING OG ANBEFALINGER	89
10.1	DOKUMENTATIONSDESIGN	89
10.2	PNEUMATISK FRAKTURERING	90
10.3	SUPPLERENDE DOKUMENTATION	92
11	REFERENCER	95
12	BILAG	97

1 Indledning

Til afdækning af mulighederne for at oprense forurening i lavpermeable jordarter, har Københavns Amt iværksat nærværende pilotforsøg til afprøvning og dokumentation af metoden pneumatisk frakturering.

Baggrund

Projektet udspringer af en række forundersøgelser til stimuleret reduktiv dechlorering, som Københavns Amt har udført på Glostrup Regnvandsbassin. Disse undersøgelser har primært omfattet et sekundært sandmagasin, men efterfølgende fokus på muligheder for oprensning af den kraftige forurening i et overliggende gytjelag har vakt interessen for afprøvning af metoden pneumatisk frakturering til forbedring af fordelingen af substrat i gytjelaget.

Idet mange sager, hvor der er efterladt restforurening, omfatter et kildeområde i morænelersaflejringer, blev det besluttet, at iværksætte et pilotforsøg, der både omfattede gytjeaflejringerne i Glostrup Regnvandsbassin samt en typisk morænelerslokalitet, således at erfaringerne med pneumatisk frakturering i større omfang kunne overføres til andre relevante lokaliteter. Som morænelerslokalitet blev udvalgt lokaliteten Vadsbyvej 16A, Hedehusene, matrikel 61, Soderup By, Fløng (tidligere del af matrikel 5a).

Der er således udført forsøg med pneumatisk frakturering på hver af de to lokaliteter. Resultaterne af de to forsøg afrapporteres i to separate rapporter.

Organisation

Projektet er finansieret af Københavns Amt og udført som et samarbejde mellem Institut for Miljø og Ressourcer, DTU og NIRAS Rådgivende Ingeniører og Planlæggere A/S, hvor NIRAS har forestået projektledelsen.

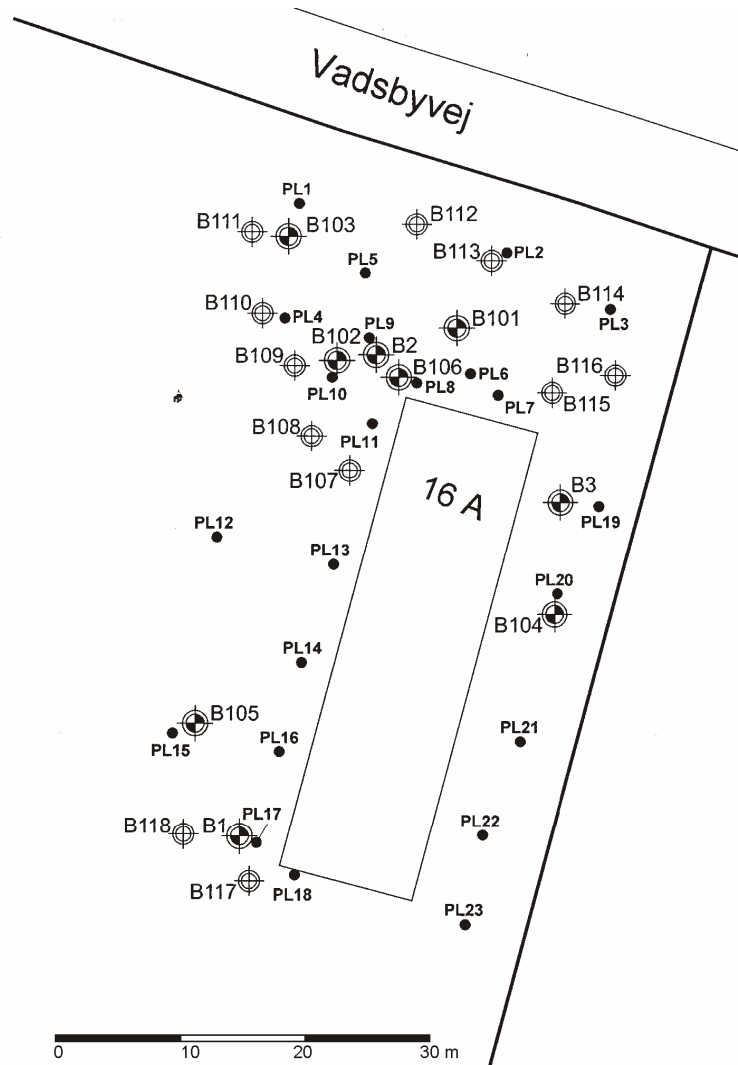
2 Baggrund og formål

2.1 BAGGRUND

Oprensning i lavpermeabel jord	Den grundlæggende forudsætning for, at en jord- eller grundvandsforurening kan oprenses in situ er, at der kan skabes kontakt mellem forureningen i undergrunden og ”oprensningsmidlet”. Fordeling af væsker eller faste stoffer i meget lavpermeable aflejringer, såsom gytje, silt og moræneler, er imidlertid en problematik, som fortsat volder problemer ved anvendelsen af in situ oprensningsmetoder. Pneumatisk frakturering er foreslået som en mulig metode til at løse dette.
Pneumatisk frakturering	<p>Pneumatisk frakturering er en teknologi, ved hvilken der i lavpermeable aflejringer kan genereres sprækker og/eller ske udbygning af de eksisterende sprækker. Denne proces skaber ideelt set et lokalt internt forbundet sprækkenetværk, som øger formationens permeabilitet. Etablering af sprækker kan skabe en mere effektiv kontakt mellem ”oprensningsmidler” og forureningsstoffer, idet større volumener ”oprensningsmiddel” kan fordeles i formationen og adgangen til hydraulisk isolerede dele af formationen muliggøres. Samtidig forventes det, at en øget opsprækning af de lavpermeable aflejringer vil give en hurtigere oprensning, idet forureningsstofferne fjernes alle er stærkt begrænset af diffusion ud af lermatrix.</p> <p>Metoden er patenteret af New Jersey Institute of Technology /5/ og bl.a. firmaet ARS Technologies /6/ har licensrettighederne til at bruge metoden i felten. ARS Technologies har udført pneumatisk frakturering på over 200 lokaliteter i USA, mens metoden med nærværende pilotforsøg er anvendt for første gang i Danmark.</p> <p>Perspektivet i at skabe kunstige sprækker vha. pneumatisk frakturering ved det aktuelle forsøg er ikke så meget at øge jordens hydrauliske ledningsevne, men i højere grad at kunne fordele en reagens i jordmatricen med henblik på oprensning af jordforureningen in situ. Med reagens tænkes specielt på substrat til stimuleret reduktiv dechlorering, kemisk oxidationsmiddel eller nulvalent jern.</p>
Pilotforsøg på to lokaliteter	Københavns Amt har iværksat et demonstrationsprojekt, der har til formål at belyse og dokumentere, hvorvidt det ved hjælp af pneumatisk frakturering er muligt at fordele en væske i en lavpermeabel jordmatrice. Metoden er afprøvet ved pilotforsøg i to forskellige geologyper; moræneler og gytje. I det følgende omtales alene pilotforsøget på morænelerslokaliteten Vadsbyvej 16A, Hedehusene.

2.1.1 Lokalteten

På Vadsbyvej 16A, Hedehusene har der i perioden 1973-1976 været kemikaliefordelingscentral og i perioden 1986-1993 maskinværksted. Til belysning af forureningsforholdene på lokaliteten har Københavns Amt udført hhv. indledende forureningsundersøgelser /1/ og omfattende forureningsundersøgelser /2/ på ejendommen i 2005.



Figur 2.1 Oversigtskort over lokaliteten

Lokaliteten er beliggende i et Område med Særlige Drikkevandsinteresser. Ca. 500 m vest for Vadsby i Soderup er der en eksisterende

vandindvindingsboring, tilhørende Soderup-Vadsby Vandværk. Endvidere er der ca. 200 m mod sydøst en privat vandindvindingsboring. Strømningsretningen i området vurderes jf. /2/ at være nordlig eller nordvestlig, formentlig rettet mod Københavns Energis kildeplads Brokilde.

Forurening

På specielt den nordlige del af lokaliteten er der konstateret forurening i poreluft, jord og grundvand med primært chlorerede opløsningsmidler og vandblandbare opløsningsmidler (isopropanol og acetone), men også med oliekomponenter. Hot spot er beliggende ved det nordvestlige hjørne af bygningen (boring B2, B101, B102 og B106), se figur 2.1.

Pilotforsøget med pneumatisk frakturering, der beskrives i nærværende rapport, er udført på den sydlige del af lokaliteten, uden for det forurenede område.

2.2 FORMÅL

Hensigten med pilotforsøget er, ved hjælp af en række forskellige dokumentationsmetoder at belyse fordelingen i jordmatricen af en injiceret tracerblanding som følge af pneumatisk frakturering fra en enkelt fraktureringsboring.

Formål

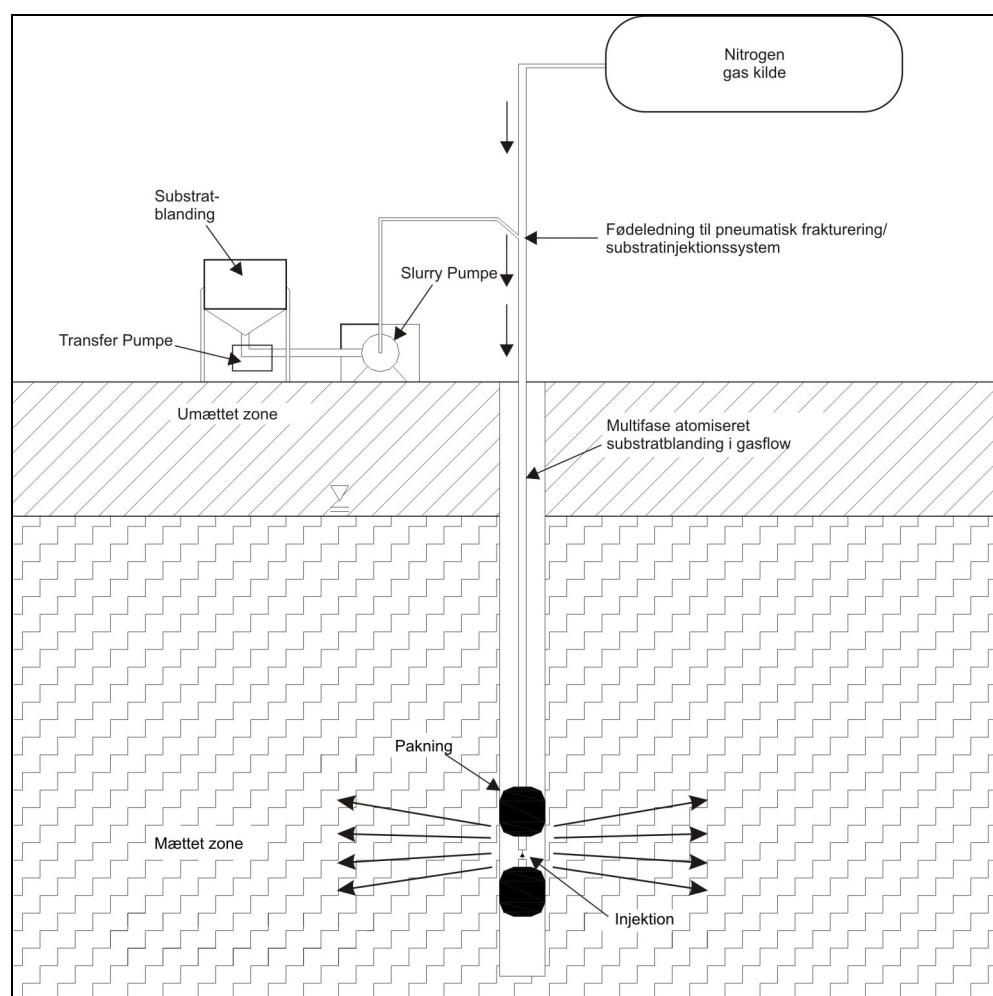
Pilotforsøget har følgende formål:

- Afprøvning og evaluering af dokumentationsmetoder, herunder afklaring af de enkelte metoders anvendelsesområde (stoffer, koncentrationsniveau, medie) samt belysning af, hvordan metoderne supplerer hinanden
- Karakterisering af det inducerede sprækkenetværk med henblik på vurdering af effekten af pneumatisk frakturering med det valgte design, herunder vurdering af sprækketæthed, -apertur, -frekvens, -orientering samt -udbredelse horisontalt og vertikalt
- Vurdering af, hvor detaljeret det med det valgte dokumentationsdesign reelt er muligt at beskrive det inducerede sprækkenetværk
- Vurdering af designparametre samt anbefalinger med henblik på mulig fuld-skala anvendelse af pneumatisk frakturering på morænelerslokalitet.

3 Strategi

3.1 PRINCIPBESKRIVELSE AF PNEUMATISK FRAKTURERING

Pneumatisk frakturering baserer sig på injektion af gas i jorden ved tryk, der overstiger det kombinerede hydrostatiske tryk og jordens brudstyrke, samt ved flowrate, der overstiger den effektive permeabilitet af den uforstyrrede jord /8/. Resultatet er en hurtig udbredelse af sprækker ud fra frakturerings-/injektionsboringen til forskellige afstande afhængig af geologien. Sprækkeudbredelser på 1-10 m er almindelige i aflejringer såsom silt og ler /7/. En principskitse af opstilling til pneumatisk frakturering er vist på figur 3.1.



Figur 3.1 Principskitse for pneumatisk frakturering

Typisk trykudvikling i fraktureringsboring

Selve fraktureringen følger typisk et tredelt forløb: Ved injektion af nitrogen i det forseglede fraktureringsinterval sker der først en trykophobning, der afspejler, at formationen endnu ikke er opsprækket, og at permeabiliteten fortsat er lav. Denne fase er relativ kort og med en typisk varighed på 1-2 sekunder. Idet trykket i boringen overstiger jordens in situ styrke i det forseglede interval, giver formationen efter og opsprækningen påbegyndes. Et stort volumen gas spredes ud i formationen i det forseglede niveau, og der sker en opsprækning af formationen radiært ud fra fraktureringsboringen. Herved falder trykket i boringen og stabiliserer sig på et niveau, mens injektionen fortsættes. Denne trykstabilisering afspejler, at der har indstillet sig en ligevægt for den pågældende flowrate. I denne fase vedligeholdes det inducerede sprækkenetværk. Herefter tilsættes væske til luftstrømmen og trykket fastholdes, indtil det ønskede væskevolumen er spredt i formationen.

Injektion ved LAI

Væsken injiceres vha. en specielt udviklet dyse, der forstøver væsken, hvorved den medrives af det kraftige nitrogenflow. Herved sikres det, at væsken transporteres ud til væsentlig større afstand end hvis den blev tilført luftstrømmen som væske. Denne proces betegnes Liquid Atomized Injection.

3.1.1 Udførelse af pilotforsøg

Pilotforsøget på Vadsbyvej 16A, Hedehusene er udført med frakturering i en enkelt boring med henblik på at belyse hver frakturerings influensradius og sprækkedannelse. Der er udført pneumatisk frakturering og injektion af tracerblanding ved Liquid Atomized Injection. Den pneumatiske frakturering er udført af det amerikanske firma ARS Technologies.

Pneumatisk frakturering kan udføres fra oven og ned eller fra neden og op. Fraktureringen i dette pilotforsøg er udført fra neden og op, dvs. startende i det dybeste interval.

3.2 DOKUMENTATION AF PNEUMATISK FRAKTURERING

Typisk dokumentationsomfang

Ud fra litteraturgennemgang samt informationer fra ARS Technologies vurderes det, at det gængse dokumentationsniveau for projekter med pneumatisk frakturering fokuserer på registrering af feltdata under selve fraktureringen (registrering af trykudvikling i fraktureringsboring, observationer og trykmålinger i observationsboringer under fraktureringer og registrering af hævninger inden for testfeltet under frakturering). Efter frakturering analyseres vandkvalitet, og oprensningseffektiviteten i etablerede monitoringsboringer vurderes. Parametervalget her afhænger naturligvis af den valgte oprensningss metode. Såfremt den pneumatiske frakturering udføres med henblik på at øge formationens permeabilitet, udføres typisk pumpeforsøg med luft eller

vand til bestemmelse af permeabiliteten og influensradius før og efter fraktureringen.

Dokumentationsprogrammet i nærværende projekt inkluderer ovenstående, men omfatter endvidere adskillige dokumentationsmetoder, der fokuserer på lokalisering af de injicerede tracere i jorden med henblik på detaljeret belysning af sprækkeudbredelsen og sprækkestrukturen i forskellige afstande og dybder. Der er ikke ved litteraturgennemgang /3/ fundet dokumentationsprojekter af et lignende omfang, der har fokuseret på beskrivelse af det dannede sprækkenetværk. Et enkelt projekt har dog søgt at dokumentere udbredelsen ved tracerinjektion og efterfølgende udgravning af testfeltet /10/.

Dokumentationsomfang i pilotforsøg

Dokumentationen af pneumatisk frakturering i nærværende pilotforsøg udføres dels vha. indirekte dokumentation (feltobservationer af trykudbredelse og jordhævninger) samt vha. direkte dokumentation (genfinding af de injicerede tracere inden for forsøgsfeltet).

Indledningsvist udføres der en række laboratorieforsøg til udvikling og afprøvning af de påtænkte dokumentationsmetoder med henblik på endelig fastlæggelse af dokumentationsprogrammet.

Dokumentationsmetoderne til genfinding af tracere vælges således at de supplerer hinanden f.eks. mht. om de giver real-time eller forsinkede data, om de udføres i felt eller laboratorium, hvilken skala de integrerer over, hvilke stoffer de måler mv. Prøvetagningsstederne placeres med henblik på at dække jordvolumenet inden for den forventede influensradius, snarere end for efterfølgende at kunne korrelere de anvendte metoder.

Genfinding af sprækker vha. tracere

3.2.1 Tracerblanding

Med henblik på dokumentation af de inducerede sprækker injiceres en tracerblanding under fraktureringen. Tracerblandingen sammensættes af fem forskellige tracere for at sikre størst mulig bredde i dokumentationsmulighederne, således at dokumentationsmetoderne kan supplere hinanden og derved muliggøre et detaljeret samlet billede af udbredelsen og fordelingen af de inducerede sprækker. De valgte tracere er uranine, rhodamine WT, optisk hvidt, methylenblåt og bromid.

Det volumen tracerblanding, der injiceres i hvert interval (50 liter) er valgt ud fra, at stofferne skal kunne genfindes, men at der samtidig ikke ønskes injiceret unødigt store mængder tracer. Det vurderes i anden sammenhæng realistisk at injicere i størrelsesorden 300-400 liter pr. interval eller muligvis endnu mere.

Trykudvikling i fraktureringsboring	<p>3.2.2 Feltobservationer</p> <p>Under fraktureringerne og tracerinjektionerne registreres relevante injektionsparametre af ARS, herunder initierings- og vedligeholdelsestryk for fraktureringen samt injektionstryk for tracerinjektionen.</p>
Trykudbredelse	<p>En indirekte metode til vurdering af influensradius, er observation af trykudbredelse i testboringer, der er etableret inden selve fraktureringen. Baggrunden er, at den injicerede gas følger den vej i jorden, hvor der er mindst modstand. Hvis gassen møder en boring eller anden penetration af jordmatricen, vil denne virke som en trykaflastning. Registrering af trykpåvirkning i en boring er således udtryk for at den injicerede gas er nået ud i den givne afstand og retning fra fraktureringsboringen. Filtersættes boringerne i flere niveauer, kan informationen om gasudbredelse detaljeres vertikalt.</p> <p>Til gengæld vil trykaflastning i en boring forhindre sprækken i at sprede sig yderligere i den pågældende retning.</p> <p>Til monitoring af trykudbredelsen, etableres testboringer med niveau-specifikke filtre i en afstand fra fraktureringsboringen, der svarer til et konservativt estimat af influensradius, dvs. hvor der som minimum forventes en trykpåvirkning.</p>
Sætninger/jordhævning	<p>Jordhævninger hhv. –sætninger inden for testfeltet som følge af hver af fraktureringerne registreres som maksimal hhv. residual jordhævning.</p> <p>Formålet med at registrere jordhævninger under fraktureringsforløbet er, at jordens maksimale hævnings kan give en indikation af den samlede sprækkeapertur som følge af fraktureringen i det givne interval. Den blivende jordhævning kan indikere, hvorvidt sprækkerne er helt eller delvist kollapsede efter at gstrykket er taget af. Hvis tiltagene er placeret, således at de dækker flere retninger fra fraktureringsboringen, kan jordhævningsdata endvidere give en indikation af, om sprækkeudbredelsen er sket radiært ud fra fraktureringsboringen eller om der er sket en præferentiel spredning i enkelte retninger.</p>
FFD-sonderinger	<p>3.2.3 Genfinding af tracere</p> <p>Umiddelbart efter at fraktureringsforsøget er tilendebragt, udføres der CPT-sonderinger med FFD-sensor til lokalisering af sprækker med høje koncentrationer af fluorescerende tracere.</p>
Kerneprøver	<p>Parallelt hermed udtages der kerneprøver, placeret hvor der på baggrund af feltobservationerne og FFD-sonderingerne forventes forekomst af inducerede sprækker.</p>

Kerneprøverne behandles i laboratoriet, hvor forekomsten af synlige sprækker med høje indhold af tracere registreres ved fotografering under UV-belysning. På baggrund heraf udtages deljordprøver til kemisk analyse for uranine, rhodamine WT og bromid.

Filtersatte lagfølgeboringer	På baggrund af feltobservationerne samt placeringen af FFD-sonderinger og kerneprøver etableres et antal niveauspecifikt filtersatte lagfølgeboringer. Hensigten med boringerne er dels at registrere forekomst af tracer visuelt (i dagslys samt under UV-lys på udvalgte prøver), dels at udtage jordprøver til kemisk analyse for uranine, rhodamine WT og bromid samt efterfølgende at udtage vandprøver til analyse for uranine, rhodamine WT og bromid.
Sugeceller	Med henblik på niveauspecifik vandprøvetagning med minimal risiko for krydskontaminering, installeres et antal sugeceller, placeret niveauspecifikt i klynger.
Vandprøvetagning	Der udtages vandprøver fra boringer og sugeceller af to omgange; dels umiddelbart efter etablering af prøvetagningsfiltrene (dvs. ca. 1½-2 uger efter fraktureringen), samt igen ca. 5 uger efter fraktureringen. Vandprøverne analyseres for uranine, rhodamine WT og bromid.
Udgravning	Endvidere foretages en udgravning op til den ene ydre grænse af testfeltet. Udgravningen foretages med henblik på karakterisering af dels det naturlige sprækkesystem, dels den visuelt registrerbare del af det inducerede sprækkesystem på lokaliteten. Registreringerne i udgravningen er udført af Camilla Christiansen og Judith Wood som del af deres eksamensprojekt udført på Institut for Miljø & Ressourcer, DTU. Udførelse og resultater er beskrevet i /3/.

4 Forundersøgelser med fluorescerende tracere

Med henblik på endelig fastlæggelse af dokumentationsprogrammet er der inden fraktureringsforsøget udført en række delforsøg i laboratoriet, der har til formål at udvikle og afprøve de påtænkte dokumentationsmetoder til efterfølgende brug i felten samt med henblik på valg af tracere til injektion. Forsøgene har fokuseret på genfinding og analyse af tre fluorescerende tracere; uranine, rhodamine WT og optisk hvidt.

Udgangspunktet for laboratorieforsøgene var, at der i felten skulle injiceres én eller flere fluorescerende tracere, som skulle genfindes vha. kerneprøver, CPT-sonderinger med FFD-sensor (Fuel Fluorescence Detector) samt analyse af jord- og vandprøver. Endvidere blev det påtænkt at injicere et farvestof, methylenblåt (brilliant blue), forudsat at dette ikke interfererede med analyser af de fluorescerende tracere. De enkelte delforsøg og anbefalingerne på baggrund heraf er kort beskrevet nedenfor, mens en mere detaljeret gennemgang findes i bilag C-F. Information om fysisk-kemiske egenskaber for tracerne er vedlagt i bilag N.

4.1 OPSKÆRING AF KERNEPRØVER

Opskæring med hobby-kniv

Der er udført forsøg med opskæring af kerner i laboratoriet vha. diamantsav med og uden vand til køling samt med hobby-kniv. Forsøgene er udført på kerner udtaget på lokaliteten Vadsbyvej 16A. Forsøget er beskrevet i bilag C. På baggrund af forsøgene er det valgt, at kerneprøver udtages i plastlinere vha. GeoProbe-systemet og opskæres på langs i laboratoriet med hobby-kniv.

4.2 BELYSNING OG FOTOGRAFERING

Der er indledningsvist udført forsøg med UV-belysning ved forskellige bølgelængder samt fotografering af vandige standarder såvel som af kerneprøver penslet med tracer til bestemmelse af den mest optimale kombination af UV-bølgelængder (366 nm, 312 nm eller 254 nm), kameraindstillinger og tracerkoncentrationer (1-1000 mg/l). Forsøgene er beskrevet i bilag C.

UV-belysning ved 312 nm

På baggrund af disse forsøg er det valgt at belyse kernerne med UV-lys med en bølgelængde på 312 nm. Endvidere vurderes der at være et tydeligt visuelt respons ved påføring af en koncentration på 1000 mg/l for hver af de tre tracere. Under UV-lys udsender uranine et gul/grønt

lys, rhodamine WT udsender et lilla/lyserødt/orange lys, mens optisk hvidt udsender et kraftigt hvidt lys.

Efterfølgende er det ved supplerende forsøg, beskrevet i bilag D, fastlagt hvilken kameraindstilling og fotoopstilling, der giver de bedste billeder under UV-lys og ved dagslys.

UV-belysning af tracerblandinger

Der er endvidere udført forsøg med belysning og fotografering af kerner, penslet med forskellige blandinger af de tre fluorescerende tracere samt methylenblåt, se bilag D. Det er fundet, at der ved injektion af uranine og rhodamine WT i de samme koncentrationsniveauer primært vil kunne foretages en vurdering af fluorescensen af uranine, idet denne dominerer. Endvidere er det fundet, at hverken optisk hvidt eller methylenblåt sammen med uranine og rhodamine WT påvirker fluorescensen fra uranine og rhodamine WT.

Forsøgene (bilag D) viser desuden, at det visuelle fluorescensrespons af uranine og rhodamine WT med de påførte koncentrationer aftager kraftigt med tiden, hvorfor fotografering af kerner fra feltlokaliteten bør foregå inden for 48 timer fra fraktureringen.

4.3 FFD-SONDE

FFD-sonden er en CPT-sonde til GeoProbe-systemet, der er påmonteret en FFD-sensor (Fuel Fluorescence Detector) i sidevæggen af sonden, der måler jordens fluorescens ved belysning med UV-lys (254 nm). FFD-sensoren har to kanaler, hvoraf den ene (HFFD) kan detektere uranine og rhodamine WT og den anden (LFFD) kan detektere optisk hvidt.

FFD-sondens følsomhed over for uranine og rhodamine WT er undersøgt ved forsøg, hvor sondens målevindue er eksponeret for stofferne i forskellige koncentrationer, se bilag C. Der er udført 2 forsøg: 1) med vandige standarder inden for koncentrationsintervallet 0,1-1000 mg/l for hver af de to tracere, og 2) med delkerneprøver fra lokaliteten, i hvilke der kunstigt er skabt en sprække med hvert af stofferne.

FFD-detektionsgrænse i vand

Forsøgene (bilag C) indikerer en detektionsgrænse i vand på ca. 100 µg/l for uranine og 1000 µg/l for rhodamine WT på HFFD-kanalen.

FFD-detektionsgrænse for kerner

På kerneprøverne indikerer forsøgene en ”detektionsgrænse” for et tydeligt respons på 1000 mg/l for uranine på HFFD-kanalen. Forsøgene med rhodamine WT er mere usikre, men detektionsgrænsen vurderes at være ca. 1000 mg/l. På baggrund af forsøgene vurderes det muligt ved feltforsøget at identificere de inducerede sprækker vha. FFD-sonden.

	Stofferne gav som ventet intet signifikant respons på LFFD-kanalen.
Ingen forsøg med optisk hvidt	Da det på daværende tidspunkt ikke var muligt at skaffe optisk hvidt hjem, er der ikke udført systematiske forsøg i laboratoriet med dette stof, men det vides fra /9/ og bilag N, at stoffet giver et tydeligt udslag på LFFD-kanalen. Der er efterfølgende påvist et tydeligt respons på LFFD-kanalen fra stoffet (uvitex) ved en ikke-kvantitativ test med eksponering af stoffet på FFD-sensoren. Stoffet kan dermed medvirke til at give en større sikkerhed ved identifikationen af sprækker vha. FFD-sonden umiddelbart efter fraktureringen.
	4.4 ANALYSE AF VANDPRØVER
Detektionsgrænse for vandanalyser	Med henblik på udvikling af en metode til at analysere uranine og rhodamine WT i vandprøver på fluorometer er der udført forsøg, som beskrevet i bilag E. Det er fundet, at vandprøverne skal pH-korrigeres (0,02 M borax-opløsning), således at forskelle i fluorescensintensiteten pga. pH-variationer undgås. Pga. fluorometerets følsomhed over for turbiditet, filtreres vandprøverne gennem et 0,45 µm filter inden analyse. Detektionsgrænsen i vandprøver er fundet til 0,0001 mg/l for uranine og 0,001 mg/l for rhodamine WT.
	Det er endvidere undersøgt, hvorvidt optisk hvidt og methylenblåt påvirker fluorometeranalysen af uranine og rhodamine WT, se bilag E. Der er ikke påvist interferens på analyserne fra disse to stoffer.
	4.5 ANALYSE AF JORDPRØVER
	Der er udført forsøg med henblik på udvikling af en metode til analyse af uranine og rhodamine WT i jordprøver, herunder udvælgelse af et egnet ekstraktionsmiddel. Forsøgene er beskrevet i bilag F.
Detektionsgrænse for jordanalyser	På baggrund af forsøgene er det valgt at anvende en 0,02 M borax-opløsning som ekstraktionsmiddel, hvorved efterfølgende pH-justering ikke er nødvendig. Ekstraktet analyseres på fluorometer. Detektionsgrænsen i jordprøver afhænger af den analyserede jordmængde, og varierer mellem 0,003-0,006 mg/kg for uranine og 0,03-0,07 mg/kg for rhodamine WT ved analyse af en jordmængde på 0,3-0,5 gram.
	4.6 VURDERING AF TRACERKONCENTRATION OG SAMMENSÆTNING
Valg af tracere	De udførte forsøg har vist, at uranine og rhodamine WT i tilstrækkeligt høje koncentrationer giver et signifikant udslag på HFFD-kanalen, men intet udslag på LFFD-kanalen. Optisk hvidt derimod giver iflg. /9/ et signifikant udslag på LFFD-kanalen og kan således bruges til at

forbedre dokumentationssikkerheden ved anvendelse af FFD-sonden, da begge kanaler i så fald kan udnyttes.

Forsøgene har endvidere vist, at det visuelle fluorescensrespons af uranine og rhodamine WT pga. diffusion, sorption og fotonedbrydelighed (kun uranine) er markant reduceret 48 timer efter injektionen. Det er således væsentligt, at FFD-sonderingerne udføres og kerneprøverne udtages hurtigst muligt efter frakturering og tracerinjektion.

Som et tillægsprojekt til pilotforsøget blev det planlagt at udføre en udgravning ved den ene ydre grænse af testfeltet til kortlægning af de naturligt forekommende hhv. de kunstigt inducerede sprækker. Udgravningen blev planlagt udført 2 uger efter tracerinjektionen. Pga. den påviste begrænsede holdbarhed af de fluorescerende tracere, blev det foreslået at injicere et kraftigt madfarvestof, methylenblåt, der ikke skulle kunne nedbrydes inden for den tidshorisont.

De udførte forsøg har vist, at hverken optisk hvidt eller methylenblåt påvirker analysen af uranine og rhodamine WT i vand- eller jordprøver.

Udover de fluorescerende tracere blev det valgt at tilsætte bromid, der er en hyppigt anvendt grundvandstracer, som er relativt enkel at analysere i vandprøver og som ikke sorberer i betydende grad.

På baggrund af ovenstående er det valgt at injicere en tracerblanding bestående af følgende stoffer:

- Uranine
- Rhodamine WT
- Optisk hvidt
- Methylenblåt
- Bromid (som natriumbromid)

Injicerede tracerkoncentrationer

Der er ved de udførte laboratorieforsøg vurderet ”detektionsgrænser” for tydeligt udslag på FFD-sonden og for tydelig visuel registrering under UV-lys (312 nm) på 1000 mg/l for hver af uranine, rhodamine WT og optisk hvidt. Der er dog ikke lavet forsøg med optisk hvidt med FFD-sonden. Da mængden af tracerblanding i de inducerede sprækker vil variere, anbefales det at injicere en koncentration af de fluorescerende tracere på 10.000 mg/l.

Ud fra diffusionsberegninger, bilag G, er det vurderet at den injicerede koncentration af bromid bør være 10.000 mg/l med henblik på at de-

tektare stoffet i vand- og jordprøver i og omkring de inducerede sprækker.

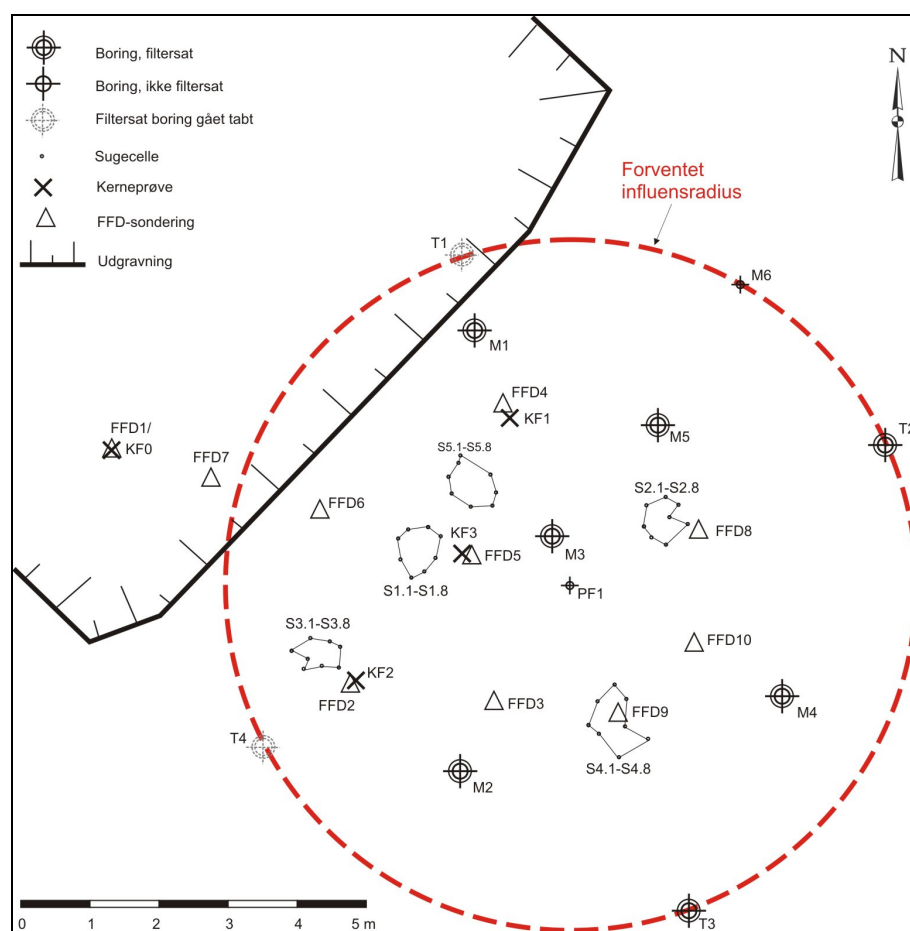
Som tidligere beskrevet ønskes det injicerede volumen tracerblanding minimeret, dels af hensyn til kvælstofforbruget, dels af hensyn til minimering af den mængde miljøfremmed stof, der tilføres formationen.

Det er på denne baggrund valgt at injicere 50 liter tracerblanding i hvert fraktureringsinterval med en koncentration af hver af de fem tracere på 10.000 mg/l.

Med en planlagt frakturering i 6 dybdeintervaller giver det en samlet injiceret mængde tracer på 3 kg af hvert stof. Antages en jævn fordeling af traceren i et volumen svarende til en influensradius på 5 meter og en dybde på 6 meter, vil injektionen resultere i en teoretisk gennemsnitskoncentration af hver af tracerne på 4 mg/kg i jorden svarende til 14 mg/l i porevandet (uden hensyntagen til sorption). Disse koncentrationer vurderes at være realistiske at detektere i forhold til den forventede analysefølsomhed for jord- og vandanalyser. Beregningerne er vedlagt i bilag H.

5 Feltaktiviteter

I det følgende beskrives kortfattet de udførte feltaktiviteter relateret til pilotforsøget. En detaljeret oversigt over de udførte feltaktiviteter samt de udførende parter er vedlagt i bilag A. Placering af undersøgelses-punkterne er vist på situationsplan i figur 5.1. Situationsplan i større skala er vedlagt i bilag B.



Figur 5.1 Situationsplan med placering af undersøgelsespunkter.

5.1 FORBEREDENDE FELTAKTIVITETER

Testboringer T1-T4

Til monitorering af trykudbredelsen under den pneumatiske frakturering, er der den 10-11. oktober 2005 udført 4 testboringer, T1-T4, placeret i 5 meters afstand fra fraktureringsboringen (PF1) i forskellige retnin-ger, hhv. NNV, ØNØ, SSØ og VSV for fraktureringsboringen.

T1-T4 er udført som 8" uforede lagfølgeboringer og filtersat i 3 ni-veauer med ø63 mm filter; hhv. 3-4 m.u.t., 5-6 m.u.t. og 7-8 m.u.t. Der

er gruskastet omkring filtrene og afproppet med bentonit mellem og over filtrene. Der er udtaget prøver hver ½ meter til PID-måling og geologisk bedømmelse. Boreprofiler er vedlagt i bilag O.

Kerneprøver

Til beskrivelse af den uforstyrrede geologi og baggrunds niveauet for fluorescens-respons ved UV-belysning samt koncentrationsniveau af tracere i jorden er der den 1. december 2005 udtaget en kerneprøve, KF0, fra 2-8 m.u.t. Kerneprøven er udtaget i en ø38 mm PVC-liner med GeoProbe. Kerneprøven KF0 er behandlet i laboratoriet sammen med de øvrige kerneprøver, således at der kunne foretages en direkte sammenligning. Beskrivelse af håndtering samt fotos af KF0 er vedlagt i bilag I.

Fikspunkter

Med henblik på registrering af evt. blivende jordhævninger/-sætninger som følge af pneumatisk frakturering, er der etableret 10 fikspunkter, h1-h10, inden for testfeltet. Fikspunkterne er etableret den 1. december 2005 ved nedramning af 3 meter lange jernrør til ca. 2 meters dybde i forskellige afstande og retninger fra fraktureringsboringen (PF1).

Fikspunkterne er nivelleret og indmålt af landinspektør den 5. december 2005, dagen inden selve fraktureringen, men efter etablering af fraktureringsboringen. Nivelleringsdata og placering af fikspunkterne er vedlagt i bilag L.

FFD-sonde baseline

Til fastlæggelse af baggrunds-FFD-responset i den uberørte moræneler er der udført en FFD-sondering, FFD1, til 4 m.u.t. FFD1 er placeret ca. 2 meter uden for testfeltet for at undgå kortslutning af gas eller tracerblanding under fraktureringen. Resultatet af FFD1 er vedlagt i bilag J.

FFD-sonderingerne udføres ved at presse, ikke banke, proben ned i jorden. For at sikre tilstrækkeligt modtryk, er GeoProben forankret vha. 1 meter lange jordankre under nedpresningen. Ved nedpresning er stenindholdet og –størrelsen i jorden mere kritisk end ved nedbankning. Ved udførelsen af FFD1 blev det samtidig afprøvet, om FFD-sonderingerne kunne anvendes på den aktuelle lokalitet.

Vandprøvetagning baseline

Til belysning af de geokemiske forhold i testfeltet samt til analyse af baggrunds niveauet af uranine, rhodamine WT og bromid er der den 24-25. oktober 2005 udtaget vandprøver fra de fire testboringer T1-T4. Vandprøvetagningsskemaer er vedlagt i bilag P og analyserapporter i bilag Q.

Opboring af fraktureringsboring, PF1

Der er den 5. december 2005 boret en foret 4" lagfølgeboring, PF1, til 10,5 m.u.t. til anvendelse som fraktureringsboring. Borejournal er vedlagt i bilag O. Foringsrøret er kun ført til 9,5 m.u.t. og er efterladt i boringen indtil umiddelbart inden fraktureringen. Dybdeintervallet 8-

10,5 m.u.t. blev boret for at få plads til den dybeste af packerne under injektionsdysen.

Geoteknik

Til beskrivelse af jordens geotekniske egenskaber er der under borearbejdet udført vingeforsøg hver $\frac{1}{2}$ meter samt udtaget B-rør til efterfølgende geotekniske forsøg. B-rørene er udtaget over og under redoxfronten, i intervallerne 2,5-3 m.u.t. hhv. 6,5-7 m.u.t. Der er udført laboratorieforsøg til bestemmelse af kornstørrelsesfordeling, hydraulisk ledningsevne (vertikal) samt konsolideringsgraden. Analyserapport er vedlagt i bilag S.

5.2 PILOTFORSØG – FELTAKTIVITETER

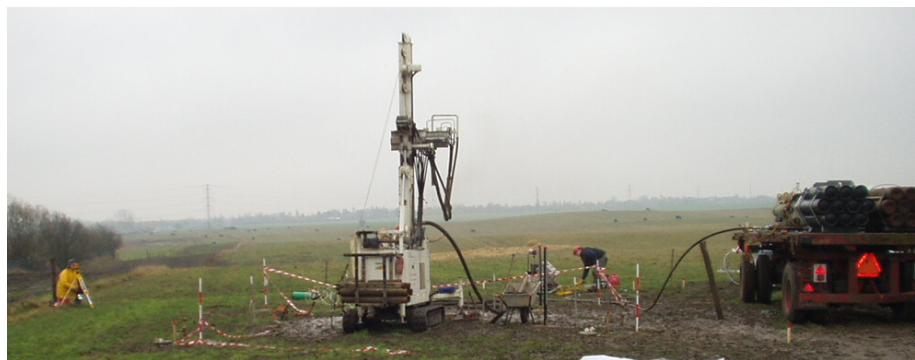
5.2.1 Pneumatisk frakturering

Pilotforsøget på Vadsbyvej 16A, Hedehusene er udført den 6. december 2005. Der er foretaget pneumatisk frakturering i én boring, PF1, i 5 intervaller af hver 1 meters længde fra 3-8 m.u.t. For hvert interval er der efter fraktureringen injiceret ca. 50 liter tracerblanding ved Liquid Atomized Injection.

Umiddelbart inden fraktureringen er forerøret trukket op til 2 m.u.t. og packerarrangementet med injektionsdysen er ført ned i bunden af boringen til det dybeste fraktureringsinterval (7-8 m.u.t.). Efter frakturering og injektion i dette interval er packeren trukket op til det næste, højere fraktureringsinterval (6-7 m.u.t.) og der er fraktureret her. Hele profilet mellem 3-8 m.u.t. er således forsøgt fraktureret.

Udstyr og opstilling

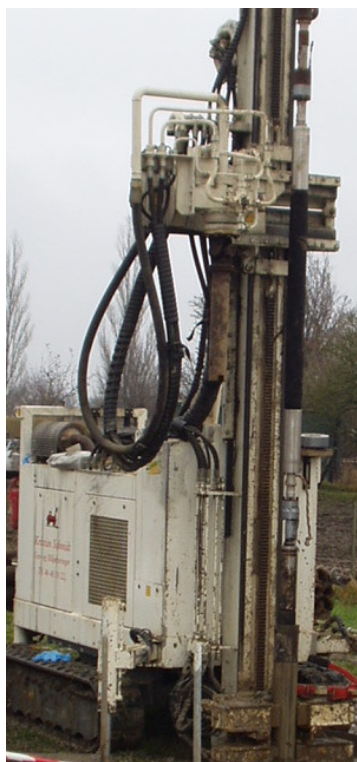
Opstillingen under fraktureringsforsøget er vist på figur 5.2.



Figur 5.2 Testfeltet under pneumatisk frakturering

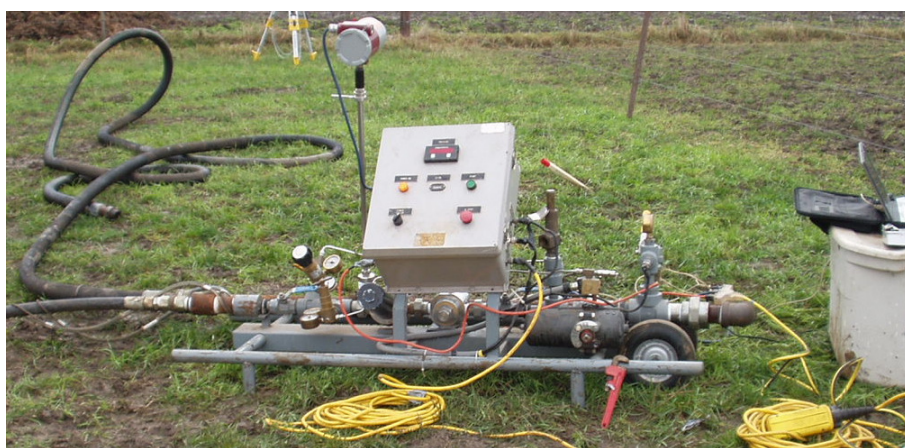
Den pneumatisk frakturering sker ved at kvælstofgas ledes ud i jorden gennem en dyse. På hver side af dysen er placeret packere af hver 1 meters længde; én packer under dysen og to packere over dysen. Inden fraktureringen, blæses packerne op vha. kvælstofgas, således at vertikale trykaflastningsveje forsegles inden gassen påtrykkes. Det område omkring dysen, der ikke er forseglet, dvs. fraktureringsinter-

vallet, er ca. 90 cm langt. Dysen og packerarrangementet er vist på figur 5.3. Den samlede længde er ca. 6 meter.



Figur 5.3 *Packersystem nedhejses i boring vha. borerig*

Gassen til fraktureringen fås fra kvælstofbatterier, placeret på en trailer (til højre i billedet på figur 5.2), der er forbundne til et reguleringsmodul (se figur 5.4), hvorfra kvælstoftryk og –flow styres. Modulet er koblet til en bærbar computer, der registrerer trykudviklingen i fraktureringsboringen og andre relevante procesparametre.



Figur 5.4 *Reguleringsmodul*

Fraktureringen er foretaget i to trin: først pneumatisk frakturering efterfulgt af tracerinjektion med påtrykt gasflow (Liquid Atomized In-

jection). Tracerinjektionen er udført ved, at traceren er pumpet fra en palletank til packerarrangementet, hvor væsken forstøves vha. kvælstofgas via en studs.

Tilsætning af tracere

Tracerne er blandet og fortyndet i felten umiddelbart inden fraktureringen. Opblandingen er udført i en palletank, hvor tracerne uranine, rhodamine WT, optisk hvidt og methylenblåt er tilsat et omtrentligt afstemt volumen vand. Natriumbromid, der findes som salt, er opløst i et mindre volumen vand inden sammenblanding med de øvrige tracere. Med henblik på at sikre fuld opblanding af stofferne, blev tracerblandingen recirkuleret gennem pumpen og tilbage til palletanken inden injektion. "Opskriften" på tracerblandingen er vedlagt i bilag H.



Figur 5.5 Tracere inden opblanding i palletank

Den tilstræbte koncentration af tracerne var 10.000 mg/l af hver for bromid, uranine, rhodamine WT og methylenblåt og 8.800 mg/l for optisk hvidt.

Efterfølgende analyse af tracerblandingen i laboratoriet og vurderinger af data fra vand- og jordprøver (bilag I) viste, at forholdet mellem bromid, uranine, rhodamine WT ca. 1:1:1. Den absolutte koncentration var på baggrund af analyser af uranine og rhodamine WT ca. 7.000 mg/l. Disse koncentrationer og det relative forhold mellem tracerne vil blive anvendt i de senere vurderinger af data.

5.2.2 Feltobservationer under frakturering

Trykudvikling i fraktureringssboring

Under selve fraktureringsforløbet og tracerinjektionerne er procesparametre vedr. tryk og kvælstof-flow i injektionsboringen registreret.

De registrerede parametre omfatter trykudvikling i fraktureringsboringen (maksimalt tryk, vedligeholdelsestryk og injektionstryk), injiceret tracervolumen samt kvælstofdata (flowrate samt start- og sluttryk i kvælstofflaskerne). Data blev registreret vha. en computer, koblet til reguleringsmodulet.

Trykudbredelse i T1-T4

Trykudbredelsen i testboringerne T1-T4 er monitoreret vha. manometre isat udvalgte filtre med et packer-arrangement hhv. blå plastikhandsker, der er tapet fast på filtrene. Manometrene låser en nål fast på det maksimale udslag, således at dette kan aflæses umiddelbart efter selve fraktureringen. Under tracerinjektionen er der i stedet for plastikhandsker isat skrueprop for at forhindre tracer i at presses op i boringerne. Monitoringsmetoden i de enkelte filtre fremgår af tabel 5.1.



Figur 5.6 *Monitering af trykudbredelse i T4 og T2.*

Tabel 5.1 Observationsmetoder for trykudbredelse i T1-T4

Filter	Dybde		Filter	Dybde	
T1-1	7-8	Plastikhandske / prop	T3-1	7-8	Plastikhandske / prop
T1-2	5-6	Manometer	T3-2	5-6	Manometer
T1-3	3-4	Plastikhandske / prop	T3-3	3-4	Plastikhandske / prop
T2-1	7-8	Plastikhandske / prop	T4-1	7-8	Manometer
T2-2	5-6	Manometer	T4-2	5-6	Manometer
T2-3	3-4	Plastikhandske / prop	T4-3	3-4	Plastikhandske / prop

Efter hver frakturering er manometrene aflæst og nulstillet, og handskerne er afmonteret og erstattet af skrueprop. Efter tracerinjektionerne er manometrene på ny aflæst og nulstillet, og skruepropperne er fjernet og erstattet af plastikhandsker.

I de 2 mest terrænnære intervaller (4-5 m.u.t. og 3-4 m.u.t.) er pneumatisk frakturering og tracerinjektion udført i samme trin umiddelbart efter hinanden. Der er derfor ikke indsamlet data efter fraktureringen, men først efter begge trin. Ligeledes er der ikke påmonteret plastikhandsker, men alene skruepropper på filtrene uden manometre.

Feltrapport for fraktureringsforsøget, herunder feltobservationerne, er vedlagt i bilag K.

Registrering af jordhævning under frakturering

Til registrering af jordhævninger under og efter fraktureringer og injektioner er der opstillet tre stadier inden for testfeltet, der er aflæst inden, under og efter hver frakturering. Resultater er vist i feltrapporten i bilag K. Endvidere har to eksamensprojektstuderende (Camilla Christiansen og Judith Wood) registreret supplerende nivellementsdata under fraktureringerne /3/. Jordhævningsdata er vedlagt i bilag L.

Nivellering af fikspunkter

Efter pneumatisk frakturering og tracerinjektion i det 3. interval (5-6 m.u.t.) er fikspunkterne h1-h10 nivelleret af landinspektør. Nivelleringen blev gennemført midt i forløbet på grund af mørkets frembrud. På grund af risiko for ændringer af hævnings-/sætningsforholdene ved feltarbejde med to GeoProbe-rigge dagen efter, kunne nivellementet ikke udskydes. Nivellementsdata findes i bilag L.

FFD-sonderinger

5.2.3 Genfinding af tracere

Til genfinding af sprækker med høje koncentrationer af fluorescerende tracere er der umiddelbart efter endt pneumatisk frakturering og den efterfølgende dag udført 9 FFD-sonderinger, FFD2-FFD10, i og umiddelbart omkring testfeltet. FFD-sonderingerne blev placeret på baggrund af feltobservationerne, iagttaget under fraktureringsforsøget, se figur 5.1.

Sonderingerne er ført til mellem 2,5 og 11 m.u.t. Sonderingerne var planlagt ført til ca. 8 m.u.t, men pga. forekomst af store sten var det flere steder ikke muligt at presse sonden dybere end 2,5-3 m.u.t.

FFD-sonderingerne er udført den 6.-8. december 2005. Resultaterne af FFD-sonderingerne er samlet i bilag J.

Kerneprøver KF1-KF3

Parallelt med udførelse af FFD-sonderingerne er der den 6.-7. december 2005 udtaget 3 kerneprøver, KF1-KF3, i ø38 mm PVC-liner med GeoProbe. Kernerne er udtaget i dybden 2-8 m.u.t. (KF1-KF2) hhv. 3-10 m.u.t. (KF3).

Umiddelbart efter udtagning af hver kerne, er kernen bragt til laboratoriet, hvor den er skåret op på langs i to halvdele. Den ene halvdel er fotograferet under først UV-lys (312 nm) og dernæst i dagslys. Sprækker med tracerforekomst er registreret, og på baggrund heraf er der udtaget jordprøver fra den anden kernehelvdel til efterfølgende analyse for uranine, rhodamine WT og bromid (kun udvalgte prøver). Kernehåndteringen er nærmere beskrevet i bilag I.

Etablering af monitoringsboringer M1-M6

Med henblik på visuel registrering af tracer, udtagning af jordprøver til analyse samt efterfølgende udtagning af vandprøver er der etableret seks lagfølgeboringer, hvoraf fem er filtersatte (M1-M5) og én ikke er filtersat (M6). Boringerne er udført som 8" tørrotationsboringer med snegl og ført til 8-10 m.u.t. Boringerne er udført uforede, da den opborede moræneler var fast og de observerede sprækker ikke var vandførende. (M1-M5) hhv. 4 m.u.t. (M6). M1-M5 er filtersat med ø63 mm filter i 3 niveauer; ca. 3-4, 5-6 og 7-8 m.u.t. og afsluttet med beton-dæksel.

Boringerne er udført den 9. og 13. december 2005. Borejournaler er vedlagt i bilag O.

Under borearbejdet er der ført borejournal med registrering af synlige forekomster af tracere og evt. sprækkestrukturer under dagslys. Der er udtaget jordprøver hver ½ meter samt ved synlig forekomst af tracer. Jordprøverne er udtaget fra sneglen og skåret rent med kniv på alle sider, jf. beskrivelse i bilag I.

Jordprøverne er opbevaret i køletaske efter udtagning og efterfølgende analyseret for uranine og rhodamine WT, jf. beskrivelsen i bilag F og I. Analyseresultater for jordprøver er vedlagt i bilag R.

Installering af sugeceller

Med henblik på udtagning af niveauspecifikke vandprøver er der i perioden 13.-19. december 2005 installeret 40 sugeceller af typen Prenart Steel, hver af 15 cm's længde. Sugecellerne er installeret ved, at jernrør med GeoProben er banket ned til det ønskede dybde, sugecel-

len med påmonteret slange er ført ned i røret, hvorefter røret er trukket tilbage. Under tilbagetrækningen af røret er der gruskastet omkring sugecellen med silicamel og herover er der afproppet med bentonit.

Sugecellerne er installeret i 5 klynger, benævnt S1-S5, hver bestående af 8 sugeceller i følgende dybder: 6,2-6,35 m.u.t. (1), 5,6-5,75 m.u.t. (2), 5,0-5,15 m.u.t. (3), 4,4-4,55 m.u.t. (4), 3,8-3,95 m.u.t. (5), 3,2-3,35 m.u.t. (6), 2,6-2,75 m.u.t. (7) og 2,0-2,15 m.u.t. (8). Tallene i parentes henviser til filternummer i den respektive klynge.

Vandprøvetagningen fra sugecellerne foregår ved at der i en 2 liters plastflaske koblet til sugecellens slange påtrykkes et vakuum, hvorved porevandet suges ud af matrix og op i flasken. Der har været påtrykt vakuum til flaskerne i ca. 1 døgn inden prøvetagning.

Vandprøvetagning

Til belysning af koncentrationsniveauet af tracere i de filtersatte intervaller er der udtaget vandprøver til analyse for uranine, rhodamine WT og bromid, dels umiddelbart efter installering af borer og sugeceller (1. runde), dels ca. 1 måned efter fraktureringsforsøget (2. runde).

1. runde er udført i perioden 12-21. december 2005, mens 2. runde er udført i perioden 9.-12. januar 2006. Der er udtaget vandprøver fra de 40 sugeceller samt fra borerne T2-T3 og M1-M5, i alt 61 vandprøver. Der er ikke udtaget vandprøver fra T1 og T4, da forseglingen i disse borer blev brudt under fraktureringsforsøget.

Vandprøvetagningsskemaer er vedlagt i bilag P, mens analyseresultater er vedlagt i bilag Q. Vandprøverne er analyseret for uranine, rhodamine WT og bromid, som beskrevet i bilag E og I.

6 Resultater

6.1 LOKALITETEN

Geologien på lokaliteten består øverst af et fyldlag, underlejret af sandet moræneler ned til 14,5-16 m.u.t., hvor der træffes et sandlag, der varierer fra 0,4 m leret finsand til 2,5-3 m fint sand. Sandlaget er ikke gennemboret, men formodes at udgøre toppen af det primære magasin i området. Moræneleret er jf. /3/ karakteriseret som en typisk dansk bundmoræne med redoxgrænsen beliggende omkring 3,2-4 m.u.t.

En situationsplan for lokaliteten med placering af de udførte undersøgelsespunkter er vist i bilag B.

Pilotforsøget med pneumatisk frakturering er udført på den sydlige del af lokaliteten, uden for det forurenede område.

Vandkemi

Vandprøver udtaget i T1-T4 inden pilotforsøget viser, at der i porevandet i de øverste 8 meter af moræneleret er svagt reducerede forhold med lave indhold af nitrat (0-6 mg/l) og indhold af ammonium på 0,2-0,6 mg/l, lokalt op til 1,4 mg/l, se bilag Q. Der ses generelt en tendens til mere oxiderede forhold i de mest terrænnære filtre (3-4 m.u.t.) med nitratinhold på 14-17 mg/l. Feltmålinger af iltindholdet viser koncentrationer på ca. 6-10 mg/l. Dette er dog behæftet med stor usikkerhed, da borerne er lavtydende og der dermed er risiko for, at prøverne iltes under prøvetagningen.

Indholdet af sulfat er relativt højt (90-150 mg/l), der er påvist indhold af sulfid lige omkring detektionsgrænsen (0,01 mg/l) og der er ikke påvist indhold af methan. NVOC-koncentrationen er 8-22 mg/l.

Hydrauliske egenskaber

Morænelerets hydrauliske ledningsevne er bestemt ved slugtests /2/ til $3,5 \cdot 10^{-7}$ m/s (8 m.u.t.) hhv. $2,1 \cdot 10^{-8}$ m/s (12 m.u.t.). Endvidere er den vertikale hydrauliske ledningsevne bestemt ved permeabilitetsforsøg på kerneprøver fra PF1 til $6 \cdot 10^{-10}$ m/s (2,6 m.u.t.) og $7,1 \cdot 10^{-11}$ m/s (6,6 m.u.t.), se bilag S.

6.1.1 Geotekniske egenskaber

Materialeegenskaber

Som led i den overordnede beskrivelse af lokaliteten er der foretaget forsøg med prøver fra fraktureringsboringen PF1 med henblik på en geoteknisk karakterisering. Resultaterne af de udførte geotekniske undersøgelser er i det følgende vurderet og tolket i relation til fraktureringsprojektet.

I tabel 6.1 er resultaterne fra de intakte rør samt vingeforsøgene fra felten gengivet. Effektiv spænding (in situ) σ'_0 er beregnet på baggrund af et terrænnært vandspejl.

Tabel 6.1 Forsøgsresultater af materialeegenskaber

Prøvedybde	γ	w	c_v	σ'_0	σ'_{pc}
Meter u. t.	kN/m ³	%	kPa	kPa	kPa
2,6	21,2	13,8	180	27	≥190
6,6	22,1	13,4	170	80	≥300

I tabellen er:

γ : Rumvægt

w: Naturligt vandindhold

c_v : Vingestyrke

σ'_0 : Effektiv spænding in situ

σ'_{pc} : Effektiv forkonsolideringsspænding

Den geologiske lagserie består til en dybde af 9 m af sandet, usorteret moræneler med vandindhold på 11,0 – 13,8 % (øverste prøve dog 16,7 %). De fundne vandindhold må betegnes som typiske for fast moræneler.

Der er udført bestemmelse af glødetab på 9 prøver med resultater i intervallet 1,27 – 1,67 % (øverste prøve dog 3,61 %).

Styrkeparametre

I forbindelse med borearbejdet blev der foretaget ophængte vingeforsøg til bestemmelse af vingestyrken c_v . For en jordart som den foreliggende kan denne størrelse sættes lig den udrænede forskydningsstyrke c_u , der direkte indgår i bæreevneformlen.

Forsøgene har vist, at der i ca. 1,5 m dybde findes et relativt slapt lag med $c_v \approx 60$ kPa. De øvrige forsøg fluktuerer mellem 120 og 230 kPa svarende til ret fast moræneler.

Deformationsparametre

I tabel 6.2 er hovedresultaterne fra de to konsolideringsforsøg angivet. Disse værdier kan anvendes i forbindelse med deformationsberegninger.

Tabel 6.2 Konsolideringsmoduler og dekadehældninger

Prøvedybde	K	Q
Meter u. t.	MPa	%
2,6	51,7	8,0
6,6	61,2	6,7

In-situ spændinger

In situ spændingen σ'_0 er vurderet ud fra antagelse om konstant, effektiv rumvægt γ' ($=11,5 \text{ kN/m}^3$) og et terrænnært vandspejl. Under disse forudsætninger fås:

$$\sigma'_0 = \gamma' * z$$

hvor z er dybden i meter under terræn.

OCR-værdier

Til nærmere fastlæggelse af overkonsolideringsforholdet OCR (Over Consolidation Ratio) kan de fundne værdier af c_v og σ'_0 direkte benyttes. SHANSEP-formlen, som modificeret til danske forhold /15, 16/, giver følgende relation mellem de tre størrelser:

$$c_v / \sigma'_0 = 0,4 \text{ OCR}^{0,85}$$

eller:

$$\text{OCR} = (2,5 c_v / \sigma'_0)^{(1/0,85)}$$

Anvendelse af denne formel ned gennem boringen giver:

Tabel 6.3 OCR-værdier for Vadsbyvej

Dybde	σ'_0	c_v	OCR
m	kPa	kPa	
0,7	8,0	140	85
1,7	19,6	60	11
2,2	25,3	180	30
4,2	48,3	120	8,6
5,2	59,8	170	10
5,7	65,6	230	13
6,2	71,3	170	8,2
7,2	82,8	170	6,6
7,7	88,6	190	7,2
9,2	105,8	220	7,0

Ikke overraskende viser OCR-værdierne en faldende tendens med dybden. Dette skyldes, at den relative aflastning under iskappens afsmeltning har været størst i toppen af profilet.

De beregnede OCR-værdier for prøverne fra PF1 angiver, at der er tale om en lettere overkonsolideret moræneler, hvorfor orienteringen af de inducerede sprækker primært må forventes at blive horisontal. Denne spændingstilstand i jorden er meget typisk for sedimenter som moræneler, der har været udsat for istidens gletschere. Lokaltiteten vurderes således at være repræsentativ for forholdene i store dele af Sjælland, Fyn og i det østlige Jylland.

6.1.2 Naturlige sprækker

De naturlige sprækker på lokaliteten er karakteriseret på baggrund af en udgravning, udført ved testfeltet /3/. En del af de registrerede sprækker er afbildet på foto fra udgravningen, vist på figur 6.1.



Figur 6.1 Registrering af sprækker i udgravning /3/. Hvert bånd på landmålerstokkene er 20 cm lange. Terræn er ca. svarende til overkanten af billedet, mens den nedre terrasse er i ca. 4 m.u.t.

Der er vurderet at være tre systemer af systematiske glacialtektoniske sprækker, 2 vertikale og 1 horisontalt, foruden de usystematiske kontraktionssprækker (kontraktionssprækker er ikke afbildet i figur 6.1), der findes i de øverste meter under terræn:

Horisontale sprækker

De systematiske horisontale sprækker er primært observeret ned til 4 m.u.t. Hovedparten er farvede pga. udfældninger eller ændringer i redoxkemi: Over redoxgrænsen er matrix olivenbrun og sprækkerne grå pga. omsætning af organisk stof, der resulterer i reducerede forhold. Omkring og under redoxgrænsen er matrix gråbrun-grå og sprækkerne er hhv. sorte og rødbrune pga. udfældninger af mangan hhv. jern. Udfældningerne indikerer, at sprækkerne er hydraulisk aktive. Disse systematiske horisontale sprækker formodes at findes i hele morænelerssekvensen.

Sprækketætheden er størst omkring 1 m.u.t. (ca. 20 sprækker pr. 20 cm) pga. de mange usystematiske horisontale kontraktionssprækker, der findes her. Sprækketætheden aftager med dybden, således at der 4 m.u.t. er ca. 1 sprække pr. 20 cm. Her findes ingen kontraktionssprækker, hvormed sprækketætheden udføres mere eller mindre udelukkende af de systematiske horisontale sprækker.

Vertikale sprækker

De to vertikale sprækkesystemer er beliggende langs hhv. et SV-NØ-plan og et S-N-plan.

Frekvensen af de vertikale sprækker er ligesom for de horisontale sprækker størst i de øverste meter og aftagende med dybden pga. de mange kontraktionssprækker i de øvre meter: Der er fundet en afstand på 12-14 cm mellem sprækkerne 1-2,8 m.u.t. aftagende til 1-1,5 meters afstand fra 4-6 m.u.t. Udbredelsen af de (systematiske) vertikale sprækker formodes at ophøre ca. 6 m.u.t., der er den nedre grænse for det sekundære vandspejl.

6.1.3 Opsummering

Den konkrete lokalitet er typisk med hensyn til det kortlagte naturlige sprækkesystem, og er en typisk repræsentant for en bundmoræne /3, 18/. Der er således påvist sprækker ned til ca. 4 m u.t., men der forventes at være enkelte dybere vertikale sprækker ned til ca. 6 m u.t.

Permeabilitetsforsøg på intakte prøver af moræneleret indikerer, at der er tale om en meget lavpermeabel matrix med en vertikal hydraulisk ledningsevne på ca. 10^{-10} m/s. De gennemførte konsolideringsforsøg indikerer en lettere grad af overkonsolidering (OCR-værdier på ca. 6-10), hvilket er typiske værdier for moræneleret på store dele af Sjælland, Fyn og øst Jylland. I denne spændingstilstand må det forventes, at de kunstige sprækker primært vil være orienteret i horisontal retning, hvilket dog ikke udelukker, at der kan dannes vertikale sprækker.

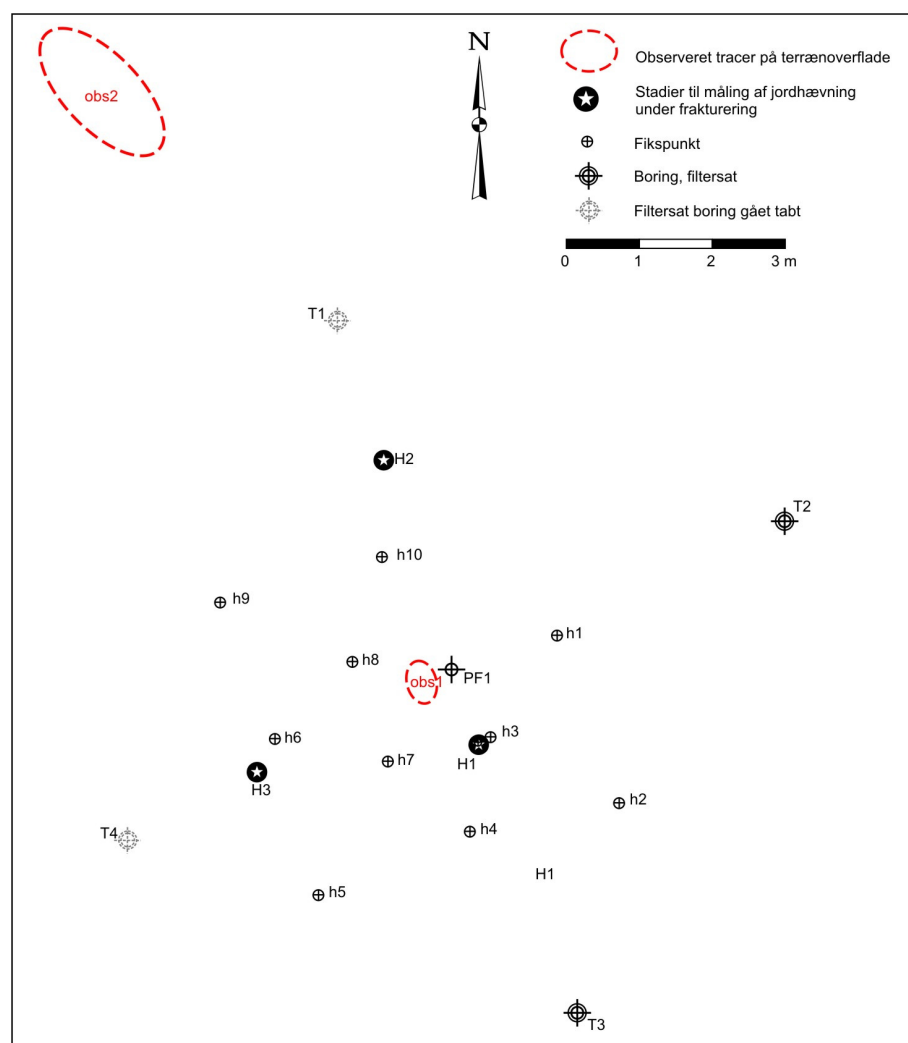
Med de bestemte geotekniske parametre er det muligt at beregne den forventede hævnings/sætning af evt. fundamenter som følge af pneumatisk frakturering, og dermed den acceptable påvirkning af en given

konstruktion for det tilfælde at der ønskes udført pneumatisk frakturering nær eller under bygninger.

6.2 FRAKTURERING

6.2.1 Observationer under frakturering

Placeringen af testboringer, observationspunkter samt fikspunkter til monitorering under selve fraktureringen er vist på situationsplan i figur 6.2.



Figur 6.2 Situationsplan med monitoringspunkter for selve fraktureringen

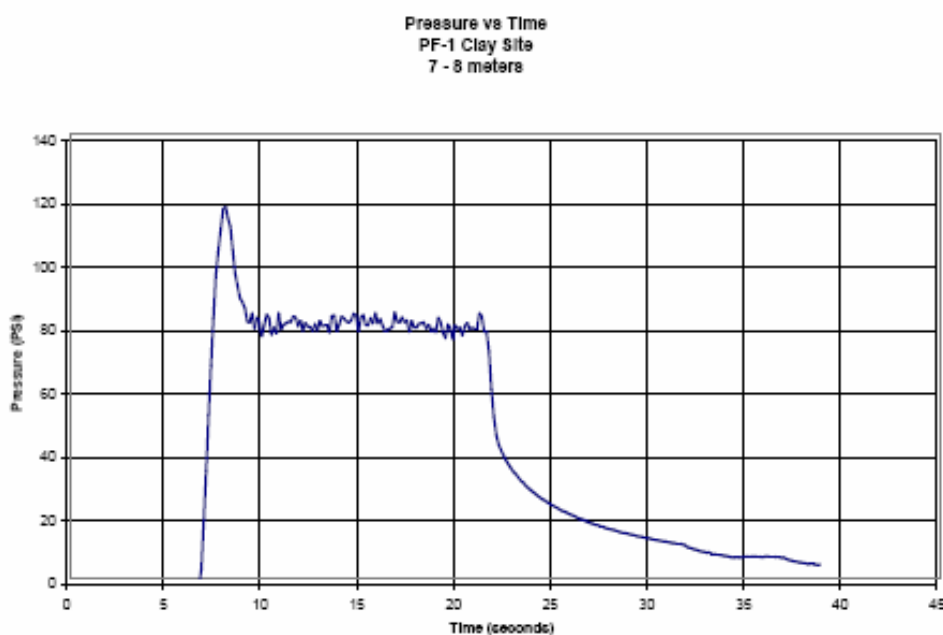
Procesparametre

Udvalgte procesparametre for fraktureringen er vist i tabel 6.4. Felt-rapport med samtlige feltresultater samt beskrivelse heraf fra ARS Technologies Inc. er vedlagt i bilag K.

Tabel 6.4 *Procesparametre for pneumatisk fraktureringsforsøg*

Interval, m.u.t.		Start tids-punkt	Varighed, sekunder	Max tryk, kPa	Vedligeholdelsestryk, kPa	Injektions-tryk, kPa	Injiceret volumen (ca.), liter	N ₂ flow, m ³ /t
7-8	Frakturering	12.31	15	862	586			1597
	Injektion	13.02	130			552	41	595
6-7	Frakturering	14.03	15	414	276			1274
	Injektion	14.11	138			207	44	552
5-6	Frakturering	15.11	15	379	138			1019
	Injektion	15.18	161			138	51	527
4-5	Frakturering	15.56	15	310	138			816
	Injektion	15.57	150			207	56	493
3-4	Frakturering	16.32	15	276	138			408
	Injektion	16.32	155			207	49	340

Trykudviklingen i PF1 under frakturering i det dybeste interval er endvidere vist i figur 6.3.



Figur 6.3 *Trykudvikling i PF1 under frakturering i det dybeste interval 7-8 m.u.t. (100 psi = 689 kPa).*

Det maksimale tryk i fraktureringsboringen under frakturering i det første, dybeste interval (7-8 m.u.t) var på 862 kPa, mens vedligeholdelsestrykket for fraktureringen var på 586 kPa. Injektionstrykket for tracerinjektionen var på 552 kPa. Ved frakturering i de efterfølgende, mere terrænnære intervaller sås faldende tryk, jo nærmere terræn. Det maksimale tryk i det øverste interval var 207 kPa.

Der blev injiceret mellem 41 og 56 liter tracerblanding pr. interval, dvs. i alt 240 liter tracerblanding. Koncentrationerne af tracerne i den injicerede tracerblanding er analyseret (se bilag I) til ca. 7.000 mg/l af uranine og ca. 7.000 mg/l af rhodamine WT. Som beskrevet i afsnit 5.2.1 antages en injiceret koncentration af bromid på ca. 7.000 mg/l. Koncentrationen af optisk hvidt og methylenblåt er ikke analyseret og antages i det efterfølgende at være 7.000 mg/l af hvert af stofferne.

Der er således injiceret en samlet mængde tracer på 1,7 kg af hver af de 5 tracere (bromid, uranine, rhodamine WT, optisk hvidt og methylenblåt).

Antages en jævn fordeling af tracerne i et volumen svarende til en influensradius på 5 meter og en dybde på 5 meter, vil injektionen resultere i en teoretisk gennemsnitskoncentration i jorden på 2-3 mg/kg af hver af tracerne svarende til en teoretisk gennemsnitskoncentration i porevandet på 8-11 mg/l af hver af tracerne, såfremt der ikke tages hensyn til sorption.

Beregningerne er vedlagt i bilag H.

Trykpåvirkning i omkringliggende boringer

Feltobservationer i forbindelse med trykpåvirkning i testboringer samt gennembrud af tracer til terræn er vist i tabel 6.5.

Tabel 6.5 Feltobservationer fra testboringerne T1-T4 under fraktureringerne

Interval Dybde, m.u.t. →	Trin *	T1-1 7-8	T1-2 ^M 5-6	T1-3 3-4	T2-1 7-8	T2-2 ^M 5-6	T2-3 3-4	T3-1 7-8	T3-2 ^M 5-6	T3-3 3-4	T4-1 ^M 7-8	T4-2 ^M 5-6	T4-3 3-4	KFO	Obs. 1	Obs. 2
7-8 m	F	>0	>0	udslip	0	0	0	0	6,9	udslip	>0	10,3	0			
	I	i.m.	0	i.m.	i.m.	0	i.m.	i.m.	0	i.m.	0	0	i.m.	+		+
6-7 m	F	0	0	udslip	0	0	udslip	udslip	>0	udslip	16,5	0	udslip			
	I	"Daylighting" af gas og tracer. Boringens bentonitforsegling er blæst op af gas. Ingen monitoringsdata fra boringens filtre.			i.m.	0	i.m.	i.m.	0	i.m.	"Daylighting" af gas og tracer. Boringens bentonitforsegling er blæst op af gas. Ingen monitoringsdata fra boringens filtre.			+	+	+
5-6 m	F				0	0	udslip	0	0	udslip						
	I				i.m.	0	i.m.	i.m.	0	i.m.				+	*	
4-5 m**	F/I				i.m.	0	i.m.	i.m.	0	i.m.				+	*	
3-4 m**	F/I				i.m.	0	i.m.	i.m.	0	i.m.				+	*	

*: F: Frakturering, I: Injektion.

M: filter bestykket med manometer med pæker. Tryk er angivet i kPa.

>0: angiver trykpåvirkning under manometerets kvantifikationsgrænse hhv. mindre oppustning af plastikhandske.

i.m.: ikke målt/observeret, da filter er afproppet med skrueprop.

Udslip angiver, at vand, gas og/eller tracer er blæst op i filter monteret med plastikhandske.

+: bobler af gas og gullig tracer observeret på terrænoverfladen.

* kraftige bobler af lilla tracer observeret på terrænoverfladen.

** : Frakturering og injektion er udført i ét trin

Frakturering 7-8 m.u.t.

Under fraktureringen i det dybeste interval (7-8 m.u.t.) blev der registreret trykpåvirkning i testboringerne T1, T3 og T4. Fotoet i figur 6.4

viser boring T3, hvor plastikhandsken på filter 3 (3-4 m.u.t.) blev blæst op under fraktureringen i dette interval. Fraktureringen i det dybeste niveau gav trykpåvirkning i alle tre filterniveauer i boring T1 og i de to øverste filtre i T3.



Figur 6.4 *Oppustet plastikhandske i filter T3-3 som følge af trykpåvirkning under frakturering 7-8 m.u.t.*

Under tracerinjektionen i intervallet 7-8 m.u.t. blev der observeret bobler af gas på jordoverfladen 2 steder uden for testfeltet: Dels ved det efterladte GeoProbe-hul, hvor KF0 var udtaget, i ca. 6,8 meters afstand fra PF1. Dels ca. 10 meter NNV for PF1 i retning væk fra T1 (benævnt obs. 2). Der var ikke forud for pilotforsøget foretaget penetrering af jordlagene på dette sted. Ved obs. 2 blev der observeret bobler af gas flere steder på jordoverfladen over et areal på ca. 1 m².

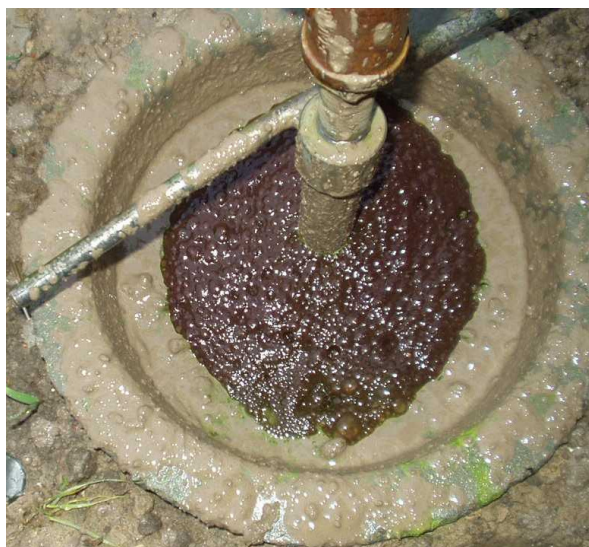
Frakturering 6-7 m.u.t.

Under fraktureringen i intervallet 6-7 m.u.t. blev der registreret trykpåvirkning i alle fire testboringer: I T1 og T2 kom der gas og vand op af det øverste filter, i T3 var der trykpåvirkning i alle tre filtre, mens der i T4 var trykpåvirkning i det dybeste og det øverste filter.

Under tracerinjektionen i dette interval brød bentonitforseglingen i boring T1 og T4, idet der langsomt boblede lilla tracer op mellem filterene i T1 og da der boblede gas og vand op mellem filterene i T4. Foto i figur 6.5 viser T1 umiddelbart efter tracerinjektionen i intervallet 6-7 m.u.t. Under frakturering og injektion i de efterfølgende intervaller er der ikke foretaget monitorering af trykpåvirkningen i T1 og T4.

Der blev endvidere under tracerinjektionen observeret mindre bobler af gas og gullig tracer på jordoverfladen ved KF0, obs.2 samt ca. ½ meter fra PF1 (benævnt obs. 1). Den gullige farve skyldes, at tra-

cerblandingen er fortyndet under spredningen i jorden, hvilket får uranine til at dominere frem for de mørkere rhodamine WT og methylenblåt.



Figur 6.5 Lillafarvet bentonit sveller langsomt op mellem filtrerne i T1 umiddelbart efter tracerinjektion 6-7 m.u.t.

Frakturering 5-6 m.u.t.

Under fraktureringen i intervallet 5-6 m.u.t. blev der registreret trykpåvirkning ved udslip af gas og vand i det øverste filter i borerne T2 og T3.



Figur 6.6 Grøn tracer boblet op mellem filtrerne i T1 under tracerinjektion 5-6 m.u.t.

Under tracerinjektionen boblede der i boring T4 igen gas og vand op mellem filtrerne. I boring T1 boblede der grøn tracerblanding op mellem filtrerne, som vist på figur 6.6. Der blev endvidere observeret min-

dre bobler på jordoverfladen af gas og gullig tracer ved KF0 og kraftigere bobler af lilla tracer ved obs. 1 (ved PF1).

Den kraftige boblen af lilla tracer umiddelbart ved fraktureringsboringen PF1 efter frakturering og injektion i de tre dybeste intervaller indikerede, at fraktureringsboringen kunne være ved at slamme til. Det blev på den baggrund vurderet, at jorden omkring fraktureringsboringen kunne være blevet for blød til at sprækkerne kunne holdes åbne indtil tracerinjektionen. Det blev derfor besluttet, at udføre frakturering og tracerinjektion i ét trin i de efterfølgende, overliggende intervaller. Dette blev endvidere begrundet med, at forseglingen i T1 og T4 var brudt og at dette brud ville blive forstærket ved efterfølgende trykpåvirkninger. Antallet af trykpåvirkninger ville således blive minimeret ved udførelse af frakturering og injektion i ét trin.

Frakturering 4-5 m.u.t.

Under fraktureringen/tracerinjektionen i intervallet 4-5 m.u.t. blev der ikke observeret trykpåvirkning i borerne T2 og T3. I boring T4 kom der igen bobler af gas og vand op i boringen, mens der i boring T1 kom bobler af gas og kraftig lilla tracer op.

Der blev igen observeret bobler af gullig tracer på jordoverfladen ved KF0 og kraftige bobler af lilla tracer ved PF1 (obs. 1).

Frakturering 3-4 m.u.t.

Under fraktureringen/tracerinjektionen i intervallet 3-4 m.u.t. blev der ikke observeret trykpåvirkning i borerne T2 og T3. I boring T4 kom der gas op i boringen, mens der i boring T1 kom ren tracerblanding op, i størrelsesorden 5-10 liter, se figur 6.7.

Der blev observeret bobler af gullig tracer på jordoverfladen ved KF0 og kraftige bobler af lilla tracer ved PF1 (obs. 1).



Figur 6.7 *Litervis af kraftig lilla tracerblanding bobler op af T1 under frakturering/injektion 3-4 m.u.t.*

En sjette frakturering og injektion var planlagt i intervallet 2-3 m.u.t., men blev undladt pga. den markante og øgede kortslutning af især T1.

Opsummering

Feltobservationerne indikerer, at der i de to-tre dybeste intervaller er sket en udbredelse af gas og formentlig tracer radiært ud fra PF1. Derover indikerer observationerne, at der i de to-tre øverste intervaller er sket en præferentiel spredning af gas og tracer i vestlig retning, styret af T4, KF0 og i særdeleshed T1, som følge af "kortslutningerne" i disse punkter. Mængden af tracer, der kommer op af boring T1 er stigende, jo nærmere terræn, der fraktureres/injiceres. Dette indikerer, at den præferentielle vestlige retning yderligere indsnævres i de øverste intervaller til at pege mod T1.

Kortslutningerne af borerne T1 og T4 kunne formentlig være undgået, hvis borerne havde været afproppet med støbt cement i stedet for bentonit.

6.2.2 Målinger af jordhævning og -sætning

Data vedr. jordhævning og -sætning er præsenteret og diskuteret i bilag L. Placering af målepunkter er vist på figur 6.2.

Jordhævning under frakturering

Manuelt nivellement af jordhævning under fraktureringen viste en maksimal hævnings af jordoverfladen i testfeltet på 1,27 cm og en tendens til mindre hævnings i større afstand fra fraktureringsboringen.

Sætninger

Digitalt nivellement af fikspunkter til måling af jordhævning under fraktureringen viste en generel sætning af jordoverfladen på 1,3 cm i hele testfeltet.

Der er således indhentet to datasæt, der er målt på samme tidspunkt, men viser helt modstridende resultater. Visuelt kunne der under den første frakturering registreres en hævnings af jordoverfladen ved fraktureringsboringen.

Det er således ikke muligt på baggrund af det konkrete pilotforsøg at konkludere, hvorvidt pneumatisk frakturering giver anledning til hævnings eller sætning af jordoverfladen eller hvorvidt der er en sammenhæng mellem jordhævninger og trykudbredelsen hhv. sprækkeudbredelsen under pneumatisk frakturering.

Det vurderes således, at målinger af hævnings/sætninger af jordoverfladen ikke umiddelbart er anvendelige til dokumentation af sprækkeudbredelsen ved pneumatisk frakturering. Dette er i overensstemmelse med erfaringerne fra udførelse af hydraulisk frakturering /12, 17/ i Danmark.

Såfremt fraktureringen foretages i nærheden af følsomme installationer, såsom ledninger og bygninger, vurderes det dog relevant at udføre målinger af fraktureringens påvirkning på terrænkoten, med henblik på at forhindre, at bygningerne/installationerne tager skade. Ifølge /11/ kan et hus som tommelfingerregel tåle en hævnings eller sætning af jordoverfladen på 1-2 cm.

6.2.3 FFD-sonderinger

Ved de gennemførte sonderinger med FFD-sonden, er der påvist en række dybdeintervaller, hvor der er signifikant respons på en eller begge de to kanaler (LFFD, HFFD). Fra de gennemførte laboratorieforsøg vides, at HFFD kanalen primært er følsom over for uranine og rhodamine WT, mens det fra /9/ vides, at LFFD kanalen primært er følsom over for optisk hvidt. I tabel 6.6 er de enkelte dybdeintervaller med signifikant udslag sammenfattet.

Som det fremgår af tabellen har det generelt været vanskeligt at nå til den ønskede dybde i ca. 8-10 meter, hvilket skyldes mange sten (>ø1 cm). Der er derfor ikke opnået den ønskede datatæthed med FFD-systemet.

Af de 10 sonderinger er der påvist signifikant udslag i 5. Kun i sondering FFD5 er der udslag på begge kanaler, og dette indikerer at den opnåede følsomhed tilsyneladende har været størst for LFFD-kanalen, der primært måler indholdet af optisk hvidt. Følsomheden er afhængig af den enkelte tracers koncentration i selve jorden. Ved laboratorieforsøg med påsmøring af tracer på kerneprøver er der tydeligt signal for Uranine og Rhodamine WT ved ca. 1.000 mg/l, mens der ikke blev gennemført tilsvarende forsøg med optisk hvidt, se afsnit 4.3.

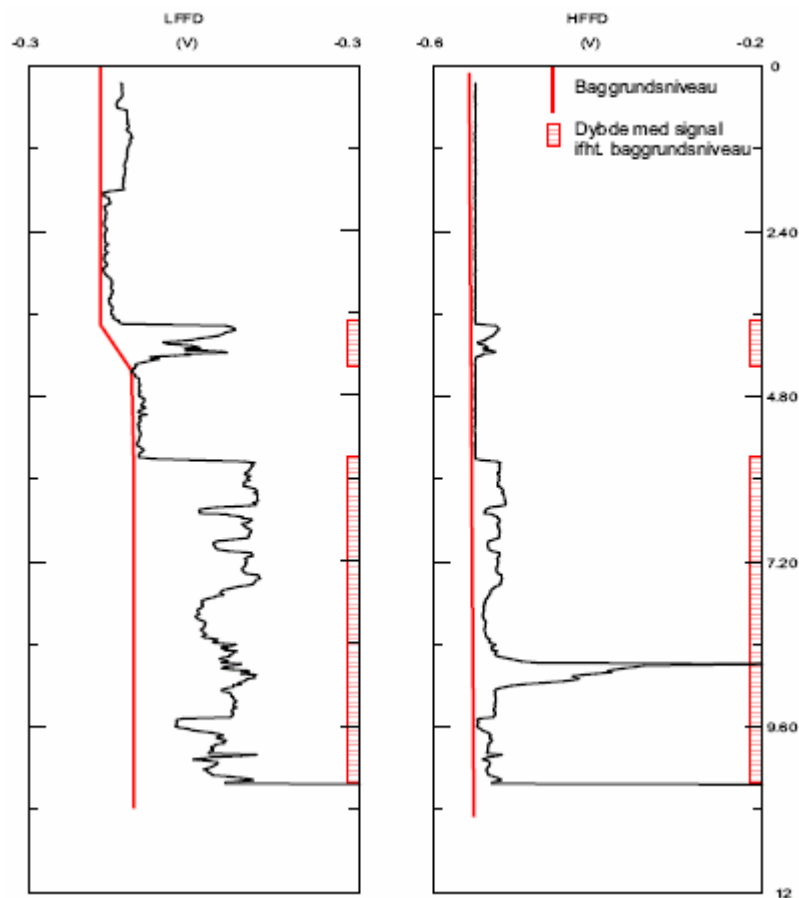
Tabel 6.6 Opsummering af respons på FFD-sonderinger

Sondering	Afstand fra PF1	Maksimal dybde	LFFD-udslag	HFFD-udslag
(-)	(m)	(m)	m u.t. - m u.t.	mut- mut
FFD1	6.9	4.45	Ingen	Ingen
FFD2b	3.5	3.37	Ingen	Ingen
FFD3	2	5.71	4.2-4.3	Ingen
FFD4	2.8	11.21	2.8+3.6-3.8+4.6-5.8	Ingen
FFD5	1.5	11.15	3.7-4.4+5.7-10.8	3.7-4.4+5.7-10.8
FFD6	3.8	3.98	1.9-2.1	Ingen
FFD7	5.4	5.35	3.6-3.8	Ingen
FFD8	2	3.24	Ingen	Ingen
FFD9	2	2.66	Ingen	Ingen
FFD10	2	2.84	Ingen	Ingen

Sonderingerne med respons er placeret i afstande mellem 1,5 og 5,7 m fra PF1. De kraftigste udslag ses på sonderingerne placeret i en af-

stand af op til ca. 3 m fra PF1. På grund af de relativt få sonderinger til mere end 4-5 mut, er der ikke data til generelt at tegne et billede af tracerne fordeling inden for hele forsøgsfeltet. Men sammenlignes dybdeintervallerne med respons i FFD4, FFD5 og FFD6, er der en tendens til at tracerne findes nærmere terræn med stigende afstand fra fraktureringsboringen.

Resultatet af sondering FFD5 er optegnet på figur 6.8. Sonderingen er placeret ca. 1,5 m fra fraktureringsboringen PF1. På plottet observeres et skift i baggrunds niveauet omkring 3,6-4 mut, svarende til redox-grænsen, hvor matrixen skifter fra en brunlig til grå farve. Dette fænomen observeres generelt for de sonderinger, der krydser denne grænse. Det første markante dybdeinterval (3,7-4,4 mut) med tydeligt respons på begge kanaler ses lige omkring redoxgrænsen. Dette interval ser ud til at være delt i to, og kan skyldes to separate intervaller med indhold af tracere. Om der er tale om 2 sprækker eller en mere jævn fordeling fra flere sprækker er vanskeligt at afgøre. Signalet aftager i bunden af dette interval relativt hurtigt til baggrunds niveauet, og dette indikerer, at der ikke sker en udtværing/medrivning af tracer på ydersiden af målevinduet.



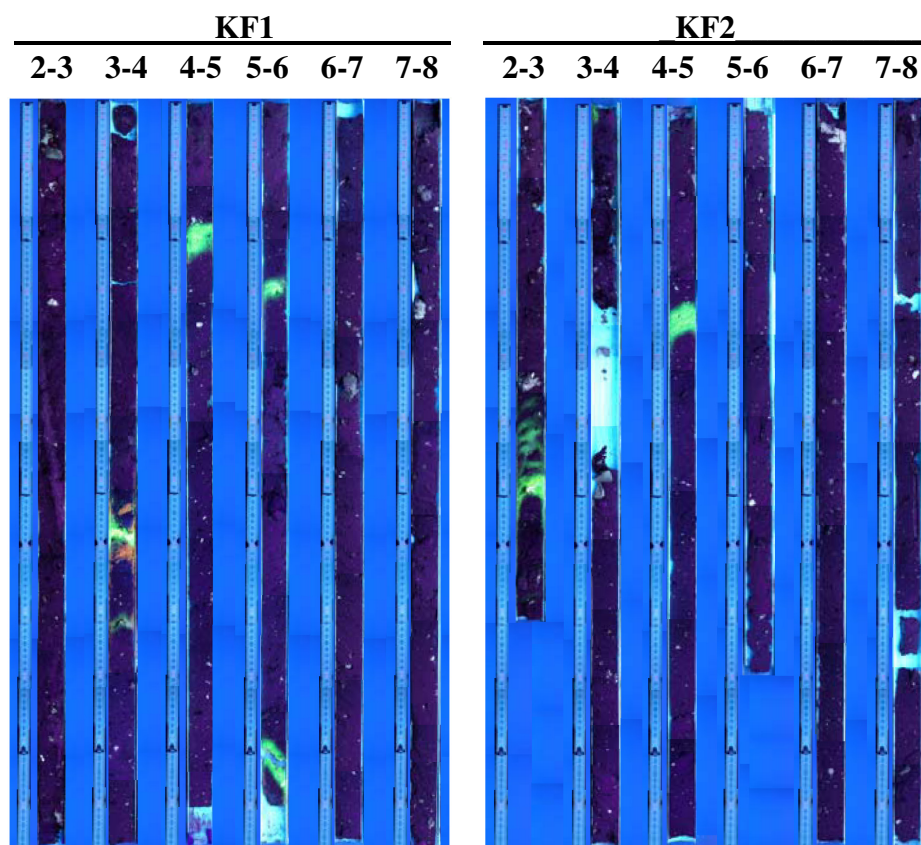
Figur 6.8 Resultat af sondering FFD4

I det dybere interval fra ca. 5,7 m og til sonderingens afslutning 10,8 mut, ses generelt et forhøjet niveau. En meget markant top ses omkring 8,6 mut, hvor HFFD signalet stiger meget brat, og igen over ca. 0,5 m aftager til det generelle forhøjede niveau. Det dybeste fraktureringsniveau var 7-8 mut, og den meget markante top i 8,6 mut samt det generelt forhøjede respons til 10,8 mut indikerer, at der er sket en påvirkning i dybder større end selve fraktureringsdybden.

6.2.4 Kerner

Fluorescens i kerner

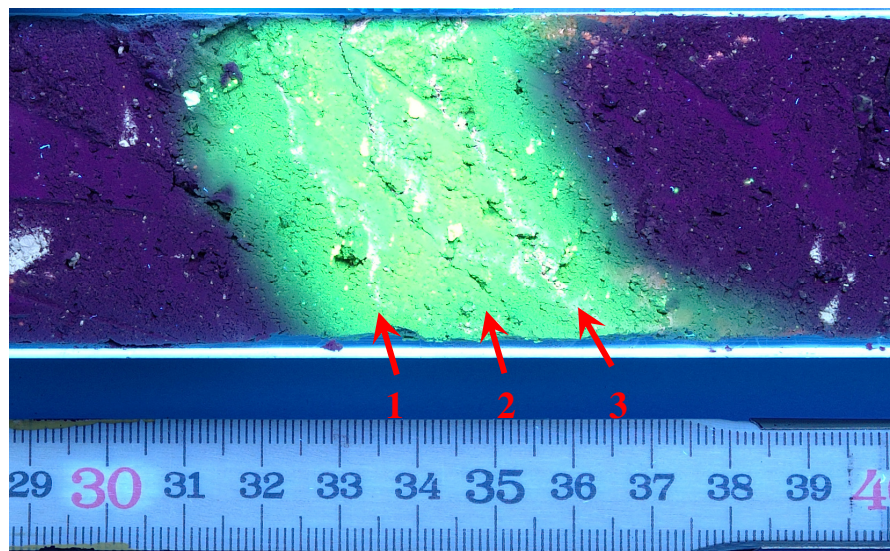
Der er i alle tre kerner fundet sprækker med tracer, men antallet af sprækker og tætheden varierer mellem kernerne og over dybden. Et eksempel på data er vist for KF1 og KF2 i figur 6.9. Ved fotografering under UV-lys er der i KF1 observeret fluorescerende områder mellem 3,5 og 6 m.u.t., med 0,5–1 meter mellem sprækkerne. I KF2 er der registreret fluorescerende områder mellem 2,4 – 2,6 m.u.t. og ved 4,3 m.u.t. Afstanden mellem de fluorescerende områder i KF2 er således ca. 2 meter. I KF3 er observeret fluorescens 3,4 – 6,4 m.u.t. I dybdeintervallet mellem 5-6,5 m.u.t. ses en tættere forekomst af områder med fluorescens sammenlignet med, hvad der er observeret i KF1 og KF2.



Figur 6.9 KF1- og KF2-kernerne fotograferet under UV-lys.

I hovedparten af de fluorescerende områder i kernerne (KF1, KF2 og KF3) ses enten ingen eller kun én tydelig sprække. I henholdsvis KF2-kernen fra 4-5 m.u.t og i KF3-kernen fra 3-4 m.u.t., er der observeret

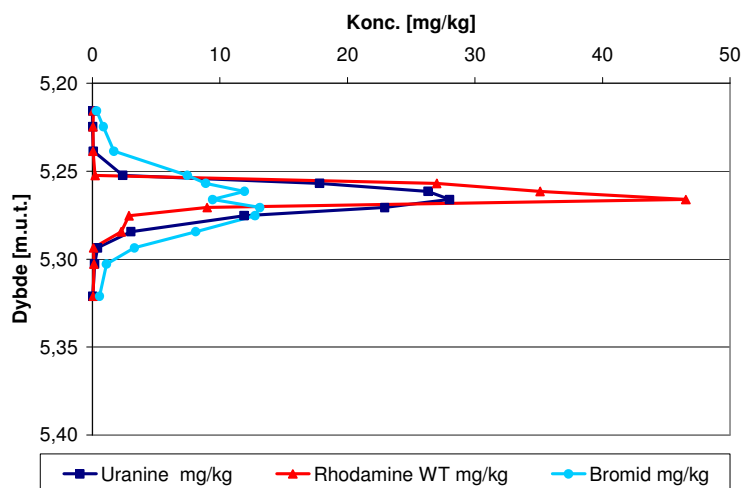
flere tætliggende sprækker med vertikal afstand ned til 0,01 m (figur 6.10).



Figur 6.10 Fluorescerende område i KF2-kernen fra ca. 4,27 – 4,33 m.u.t. Inden for det fluorescerende område er dannet 3 sprækker med en indbyrdes afstand af ca. 0,01 m.

Jordanalyser fra kerner

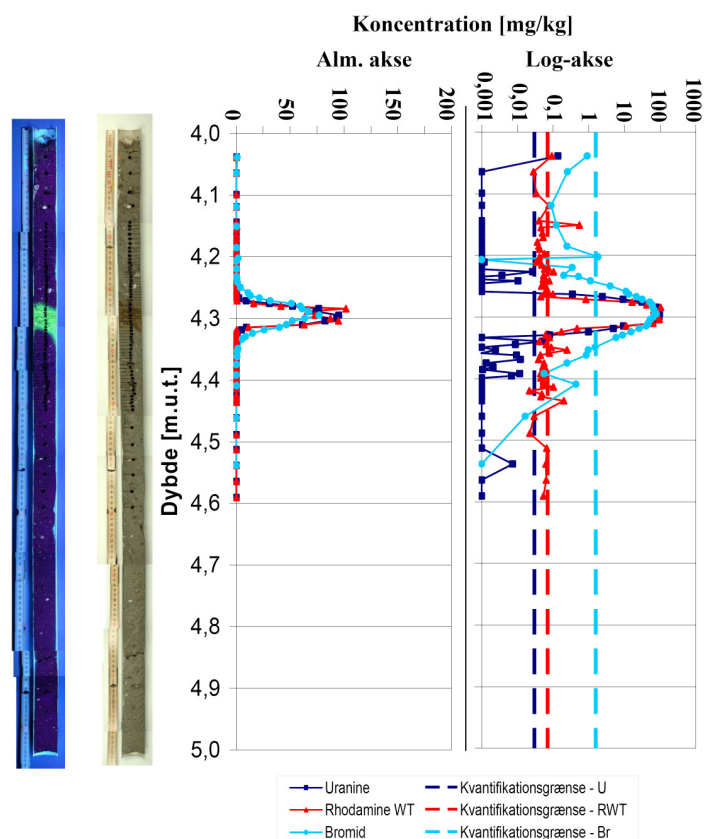
Der er analyseret for fluorescerende tracere og bromid i fire detailområder i kernerne KF1 (4-5 m.u.t. og 5-6 m.u.t.) og KF2 (4-5 m.u.t.). Detailområderne er placeret, hvor belysning med UV-lys viste tydeligt fluorescerende sprækker. Et eksempel på koncentrationerne af de tre tracere uranine, rhodamine WT og bromid målt i KF1 (5,22-5,35 m.u.t.) er afbildet i figur 6.11.



Figur 6.11 Koncentration af uranine, rhodamine WT og bromid i delprøver udtaget fra sedimentkernen KF1 (5,22-5,35 m.u.t.) fra Vadsbyvej, Hedehusene.

Det ses, at koncentrationsfordelingen er sammenfaldende for de tre tracere. I midten af sprækken er koncentrationen af rhodamine WT højest, og bromidindholdet mindst, mens det forholder sig omvendt i udkanten af detailområdet. Det skyldes, at bromid sorberer mindre og diffunderer hurtigere ind i matrix end især rhodamine WT.

Når koncentrationerne målt i delprøverne udtaget i kernerne sammenlignes med fotografier af kernerne taget under UV-lys, ses en meget god overensstemmelse mellem toppene på grafen og det fluorescerende område (figur 6.12).



Figur 6.12 Koncentration af uranine, rhodamine WT og bromid i delprøver udtaget fra sedimentkernen KF2 (4-5 m.u.t.) fra Vadsbyvej, Hedehusene.

I samtlige detailområder er koncentrationerne af tracere i umiddelbar nærhed af visuelt detekterbare sprækker (under UV-lys) højere end analysernes kvantifikationsgrænse, mens koncentrationerne uden for de fluorescerende områder overvejende er under kvantifikationsgrænsen (figur 6.12).

Visuel detektionsgrænse

Der er på baggrund af sammenligning mellem målinger og observationer estimeret en visuel detektionsgrænse for fluorescerende områder under UV-lys på 1-10 mg uranine/kg (bilag I).

På baggrund af observationer under UV-lys og analyser af udvalgte kerneprøver er der identificeret en række veldefinerede sprækkeområder. De målte koncentrationer af tracer vurderes at være troværdige. Der kan i områder, hvor der ikke er udvalgt prøver til kemiske analyser være uranine tilstede i koncentrationer under den visuelle detektionsgrænse på 1-10 mg uranine/kg.

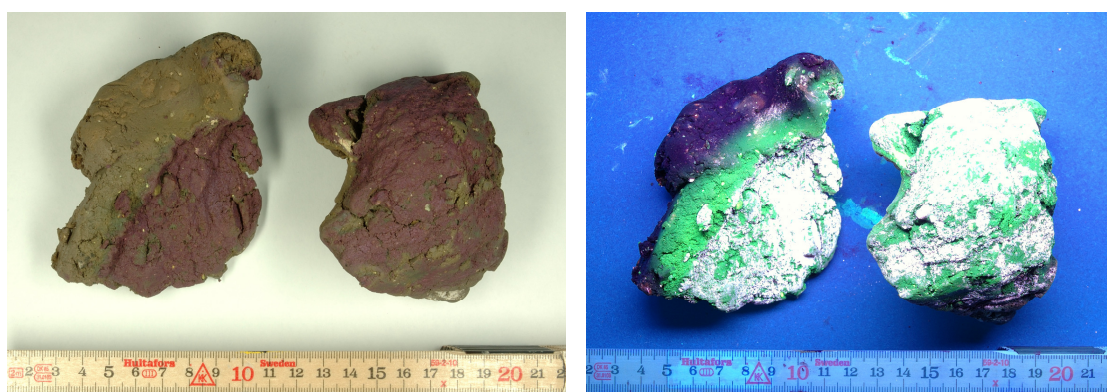
6.2.5 Jordprøver fra M1-M6

Visuel registrering af tracer i dagslys

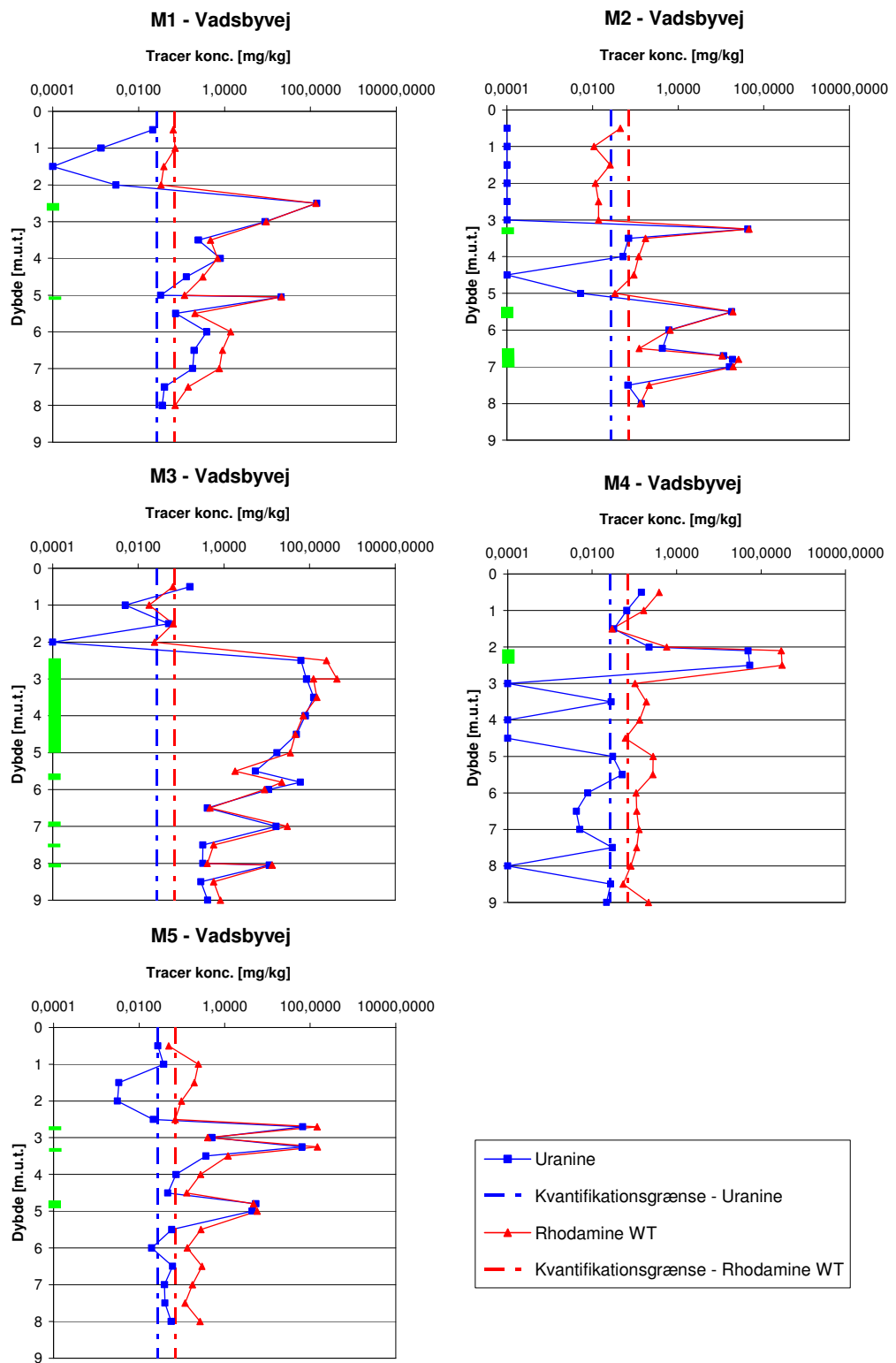
Fra M1-M6 er der udtaget jordprøver til analyse for de fluorescerende tracere uranine og rhodamine WT. Endvidere er enkelte jordprøver fotograferet i felten og/eller i laboratoriet under alm. lys samt UV-lys (se eksempler i 6.13 og 6.14).



Figur 6.13 Opboring fra M5 med tracerholdig sprække på sneglebor i 2,7 m.u.t.



Figur 6.14 Jordprøve udtaget fra sneglebor fra M2 i 3,2 – 3,3 m.u.t. Til venstre ses jordprøve i dagslys, mens billedet til højre er taget under UV-belysning.



Figur 6.15 Koncentrationer af fluorescerende tracere i jordprøver fra M1-M5 samt kvantifikationsgrænser for hhv. uranine og rhodamine WT for jordprøver. De grønne afmærkninger på y-aksen viser, hvor der visuelt kunne ses tracer under opboringen af M-boringen.

I figur 6.15 er koncentrationerne af fluorescerende tracere i de enkelte M-boringer afbildet som funktion af dybden. Endvidere er angivet i hvilke intervaller, tracer blev observeret under opboringen af M-boringerne felten.

Jordanalyser

Af figur 6.15 ses, at der forekommer distinkte forhøjede koncentrationer i enkelte jordprøver fra alle M-boringerne. Mellem disse forhøjede koncentrationer ligger koncentrationerne generelt over kvantifikationsgrænserne for analysen.

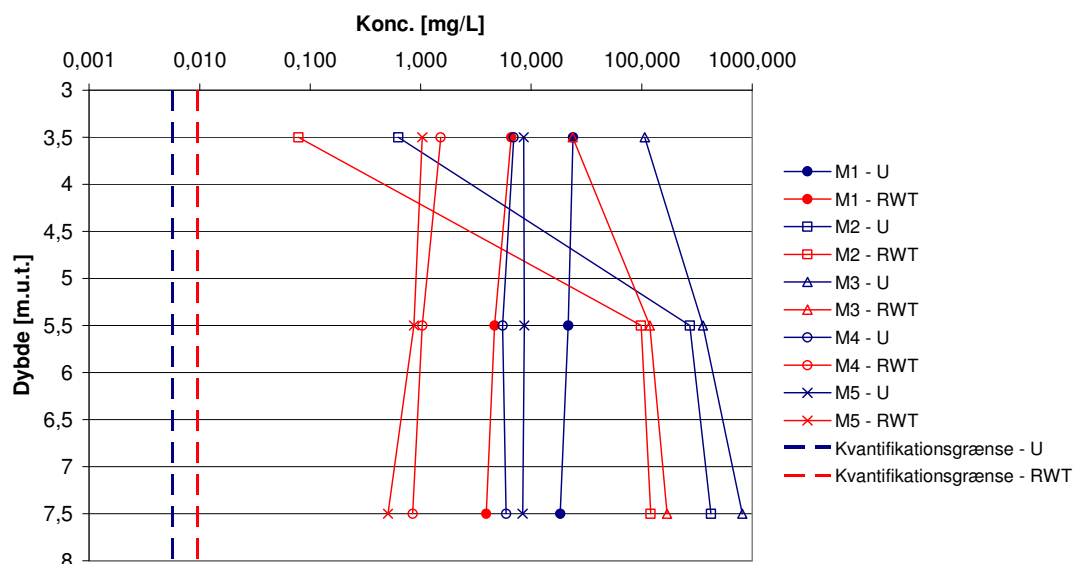
I M3 (udtaget 0,75 meter fra fraktureringsboringen, se bilag B) ses en forhøjet forekomst af begge tracere fra ca. 2,5 – 6 m.u.t. samt henholdsvis 7 og 8 m.u.t.. Hermed er tracer fundet i hovedparten af jordprøverne udtaget i M3-boringen. For M4 ligger uranine koncentrationen under kvantifikationsgrænsen under 3 m.u.t., mens rhodamine WT koncentrationen ligger over eller lige under kvantifikationsgrænsen. I de resterende M-boringer forekommer høje tracerkoncentrationer i enkelte dybder. I alle M-boringer er fundet tracerkoncentrationer på 50-150 mg/L for begge tracere i jordprøver udtaget 2-3,5 m.u.t. Der ses en god overensstemmelse mellem koncentrationspeaks og de i felten visuelt observerede (ikke under UV-lys) tracerforekomster.

Jordprøverne giver i felten en god visuel identifikation. De målte koncentrationer af tracer vurderes at være troværdige. Dog bør observationer, hvor uranine er omkring eller under kvantifikationsgrænsen og rhodamine WT umiddelbart over kvantifikationsgrænsen benyttes med varsomhed. Det drejer sig især om prøver under 3 m for boring M4 og prøver under 6 m for boring M5. I disse prøver er der ikke visuelle feltobservationer eller observation under UV-lys, som understøtter målingerne. Med den anvendte fastlæggelse af kvantifikationsgrænsen (1 gange standardafvigelsen) kan det ikke udelukkes, at der er tale om variationer i det naturlige baggrundsniveau. Alternativt kan det skyldes afsmitning fra kniven ved tilskæring af jordprøven i felten og efterfølgende spredning ved diffusion.

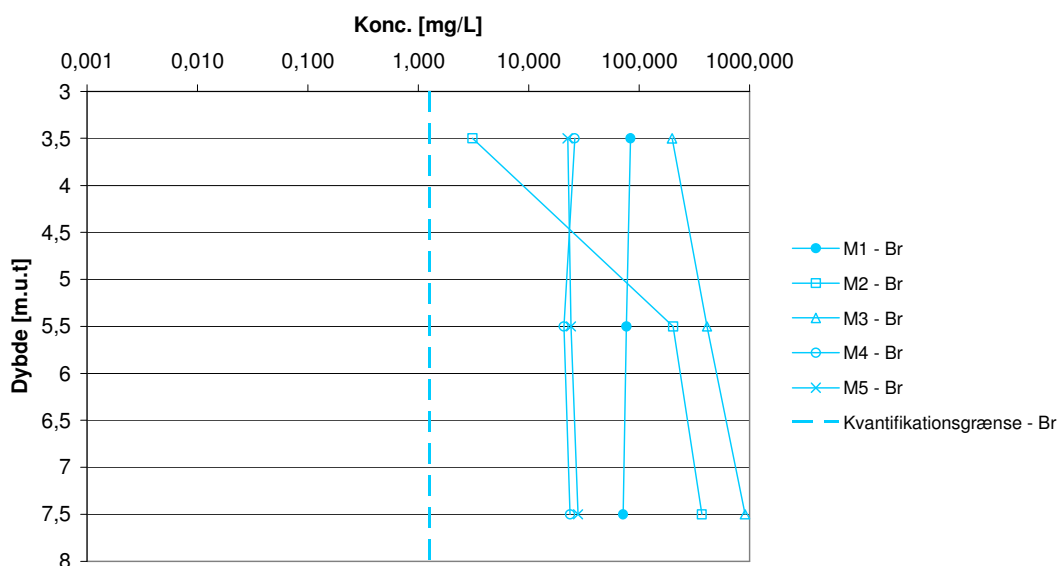
6.2.6 Vandprøver i traditionelle filtre (M- og T-boringer)

Uranine og rhodamine WT

Koncentrationerne af de tre analyserede tracere ligger i vandprøver fra alle M-boringer, for begge prøvetagningsrunder, over de respektive kvantifikationsgrænser. Koncentrationerne af uranine og rhodamine WT i samtlige M-boringer for første runde er afbildet i figur 6.16 og 6.17.



Figur 6.16 Koncentrationer af uranine og rhodamine WT fra prøvetagningsrunde 1 som funktion af dybden (m.u.t.).



Figur 6.17 Koncentrationer af bromid fra prøvetagningsrunde 1 som funktion af dybden (m.u.t.).

Generelt varierer koncentrationen af tracerne vertikalt i M-boringerne forholdsvis lidt, mens der er store forskelle i koncentrationsniveauerne mellem de enkelte boringer. I det øverste filter i M2 er forekomsten dog ca. en faktor 100-200 lavere end i de to nederste filtre i samme boring. Det typiske niveau i runde 1 er for uranine mellem ca. 0,6 og 800 mg/L, mens rhodamine WT koncentrationerne ligger mellem 0,1 og 170 mg/l. Bromid er tilsvarende fundet i koncentrationer på mellem ca. 3 og 900 mg/L. Den højeste forekomst af tracer er fundet i M3, som er beliggende 0,75 meter fra fraktureringsboringen, jf. bilag B.

Bromid

Bromidkoncentrationerne ligger på niveau med eller højere end uranine koncentrationerne. Koncentrationsforskellene for uranine og rhodamin WT afspejler forskelle i stoffernes sorptionsegenskaber, således at rhodamine WT, som sorberer mest, findes i de laveste vandkoncentrationer.

I hovedparten af filtrene i M-boringerne ses et fald i koncentrationerne af de tre tracere mellem de to prøvetagningsrunder. Det kan skyldes at der sker et øget sorption og fortynding med vand fra sprækker og matrix uden tracer.

For T-boringerne er koncentrationerne i begge prøvetagningsrunder under ca. 0,1 mg/L for både rhodamine WT og uranine. Koncentrationen af bromid i vandprøverne er under detektionsgrænsen på 0,60 mg/L i samtlige vandprøver med undtagelse af T3-3, hvor koncentrationen i runde 2 er 1,3 mg/L.

Krydskontaminering

Forekomsten af tracer over dybden vurderes ikke at være troværdig på grund af den meget begrænsede variation i koncentrationer. Det antages, at det skyldes installationsmetoden, som har forårsaget smearing over dybden og tilstedeværelse af tracer i formation og gruskastning. På grund af formationens lave permeabilitet er det ikke lykkedes at fjerne tilstrækkeligt med vand ved prøvetagning til at eliminere denne fejlkilde.

Det konkluderes, at vandprøverne kan anvendes til at vurdere den horisontale udbredelse, således at boringerne med høje koncentrationer afspejler afstande med større påvirkning end boringer med lave koncentrationer

6.2.7 Vandprøver fra sugeceller

Koncentrationen af uranine, rhodamine WT og bromid i sugecellerne er afbildet i figur 6.18.

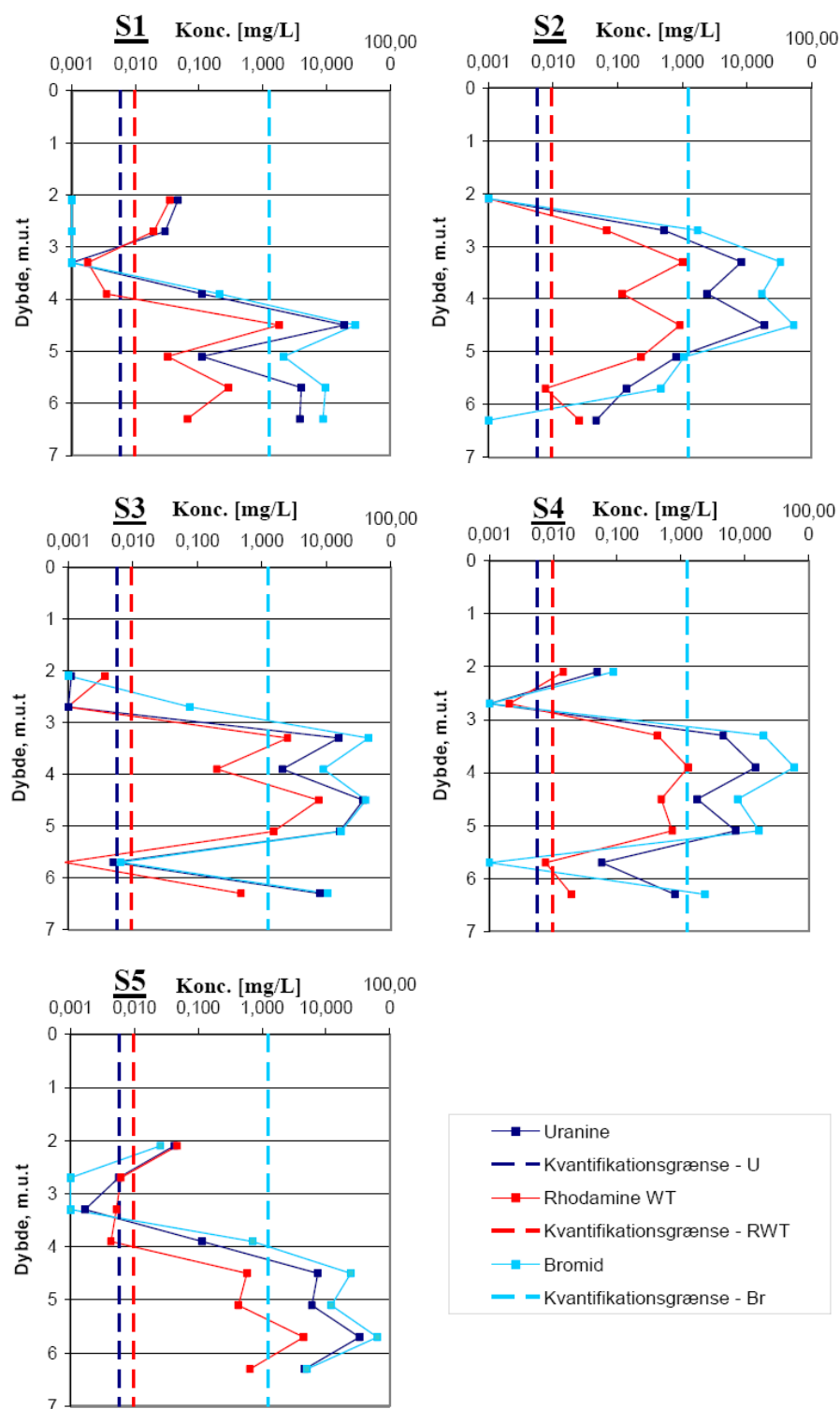
For S2, S3 og S4 findes koncentrationer af tracer over kvantifikationsgrænsen i 3,3 – 5,1 m.u.t., mens der i sugecellerne S1 og S5 ses koncentrationer af tracer over kvantifikationsgrænsen i filtre placeret fra 3,9 m.u.t. og til det nederste filter placeret 6,3 m.u.t. Der er tydelige koncentrationsforskelle for alle tre tracere mellem de enkelte filtre. I flere af profilerne er forekomsten af tracer ikke afgrænset vertikalt, så der fx, i S5 forekommer høje koncentrationer i den nederste sugecelle.

Generelt ses, at bromid forekommer i højest koncentrationer (op til 64 mg/l), mens vandprøverne i sugecellerne indeholder mindst rhodamine WT. Der er målt koncentrationer af uranine og rhodamine WT på op til henholdsvis 37 mg/l og 8 mg/l.

Forskellene i koncentrationerne af uranine og rhodamine WT afspejler som for vandprøverne i M-boringer forskelle i stoffernes sorptionsegenskaber. Rhodamine WT sorberer mest og findes derfor i de laveste koncentrationer.

Der ses ikke en tydelig tendens til ændringen i koncentrationerne i vandprøverne mellem første og anden prøvetagningsrunde.

Der observeres tydelige vertikale variationer i alle profiler. Det viser, at der som forventet ikke er forbindelse mellem de separat installerede sugeceller og heller ikke tegn på at tracer er trukket med ned under installationen. Det vurderes på den baggrund af alle målinger af tracerkoncentrationer over kvantifikationsgrænsen afspejler reel forekomst af tracer i den pågældende dybde.



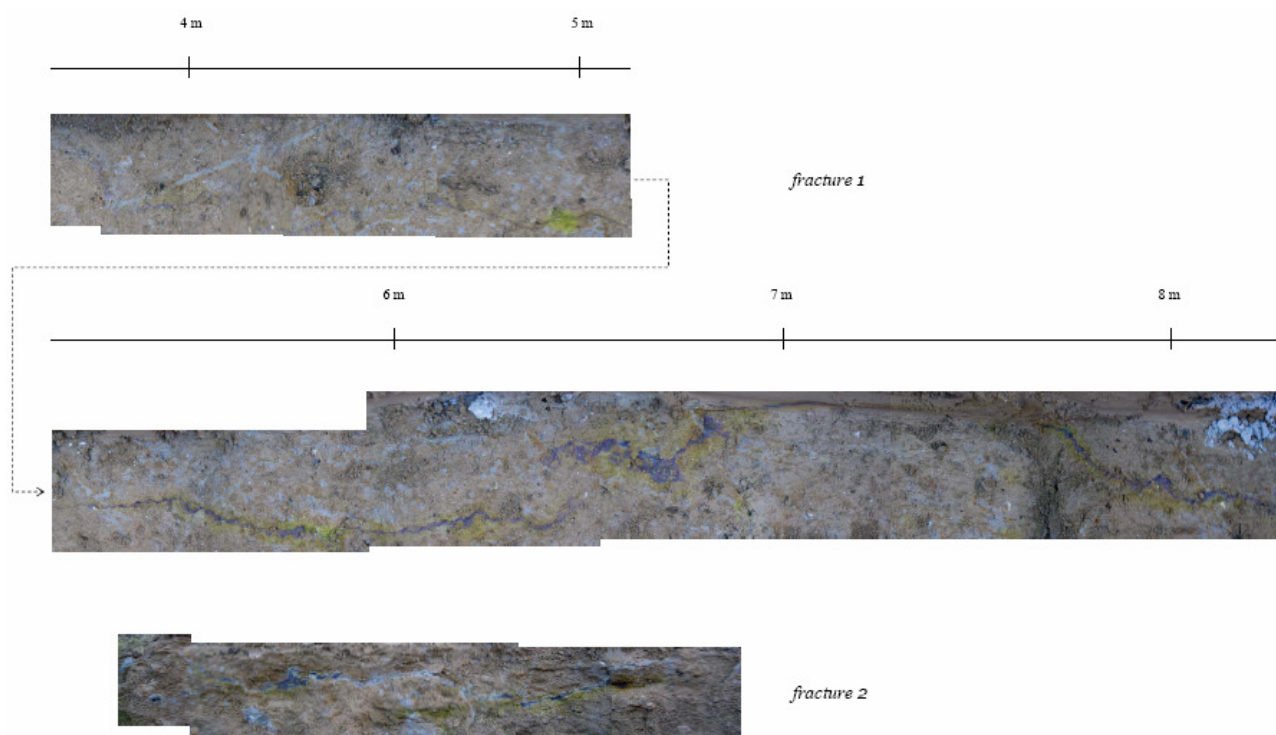
Figur 6.18 Koncentration i vandprøver fra sugeceller benævnt S1 – S5 fra runde 1. Hver klynge består af 8 sugeceller installeret med 0,5 meters afstand.

6.2.8 Udgravning

To inducerede sprækker, kendetegnet ved en blå-lilla farve, blev observeret i udgravningen ca. 6 dage efter fraktureringen. Begge blev observeret på udgravningens SØ-vendte væg, dvs. den vestlige udkant

af fraktureringsfeltet. Sprækkerne er afbildet i figur 6.19. Sprække 1 (*fracture 1*) havde en synlig udbredelse på ca. 4 m i 2,2 m u.t., mens sprække 2 havde en synlig udbredelse på ca. 2 m i 2,7 m u.t. Begge sprækker var meget bølgede, men havde en overordnet afstand på hhv. 4,8 og 6,4 m til fraktureringsboringen PF1. Deres indbyrdes afstand var således 1,6 m. Sprækkernes tykkelse varierede fra ca. 0,01 mm - 2 cm.

Begge sprækker var omkranset af en grå-farvet, siltet ler i det ellers brunlige moræneler. Dette indikerer, at sprækkernes udbredelse er sket via hydraulisk aktive, naturlige sprækker, evt. system 2 (se afsnit 6.1.2). Sprækkernes hydrauliske aktivitet blev bekræftet af væsentlig tracer-udsivning herfra i løbet af de dage, som feltaktiviteterne i udgravningen stod på (6-8 dage efter fraktureringen). Inden for dette tidsrum blev et diffust gul-grønt bånd ydermere observeret omkring sprækkerne. Dette forklares af diffusion af uranine fra sprækkerne ud i lermatricen. Ved UV-belysning fremstod sprækkerne og området omkring således med en kraftig gul-grøn fluorescens.



Figur 6.19 Inducerede sprækker observeret i udgravning. Målestok angivet i forhold til afstand fra udgravningens NØ hjørne.

7 Praktiske aspekter

Et af formålene med udførelse af pilotforsøget, var at høste erfaringer med anvendelsen af metoden i praksis. I det følgende beskrives en række praktiske problemstillinger i forbindelse med pneumatisk frakturering, der er truffet ved udførelse af pilotforsøget.

Anvendelse af testboringer Forud for pilotforsøget blev der etableret fire testboringer til monitoring af trykudbredelsen under selve fraktureringen. Placering af testboringerne er sket ud fra følgende overvejelser/afvejninger:

En filtersat testboring muliggør observation af trykudbredelsen fra fraktureringsboringen og giver dermed en indikation af, hvor langt væk fra fraktureringsboringen, i hvilke dybder og i hvilke retninger, gassen har spredt sig. Dette sker ved, at gassen stiger op til terræn via boringens filtre, der således fungerer som en lokal trykaflastning for den injicerede gas. Dette bevirker til gengæld, at gassen forhindres i at sprede sig yderligere i den pågældende retning. Dvs., at en testboring kommer til at fungere som en barriere for sprækkeudbredelsen, men dog kun inden for det, begrænsede, areal, som boringen dækker. Denne effekt giver derfor anledning til overvejelser omkring hvilken afstand testboringerne skal placeres i, idet der ønskes et respons i boringerne og omvendt ønskes en maksimal sprækkeudbredelse.

I det udførte pilotforsøg er testboringerne placeret i 5 meters afstand fra fraktureringsboringen i 4 forskellige retninger. Afstanden er valgt ud fra, at der på baggrund af ARS' erfaringer forventedes en gasudbredelse på minimum 5 meter, måske helt op til maksimalt 10 meter, men ikke nødvendigvis en tæt sprækkeudbredelse ud til 5 meter eller derover.

I og med at lagfølgen penetreres ved etablering af en testboring, vil der være en risiko for at der sker kortslutning af gassen og det injicerede stof i boringen, såfremt forseglingen ikke kan modstå det høje gastryk. Denne risiko kan naturligvis minimeres ved optimal forsegling (se kommentar nedenfor), men kan ikke helt elimineres.

På baggrund af resultaterne af pilotforsøget vurderes der ikke umiddelbart at være en god sammenhæng mellem trykudbredelsen og udbredelsen af tracerfyldte sprækker.

Ved udførelse af pneumatisk frakturering i fuld skala, anbefales det ikke at etablere testboringer, givet de risici, der er ved penetrering af jorden i det område, der ønskes oprenset.

Forsegling af testboringer mv.

De etablerede testboringer blev etableret ca. 2 måneder før pilotforsøget og forseglet med bentonit. Bentonit-forseglingen viste sig ikke at være stærk nok og blev brudt i to af boringerne under den pneumatiske frakturering. Dette vurderes at have haft en begrænsende effekt på tracerudbredelsen i det udførte pilotforsøg, idet der er sket en kortslutning af tracer til de to boringer, hvilket har forårsaget en præferentiel spredning af tracer i retning af de to kollapsede boringer i de øvre fraktureringsintervaller. Det anbefales derfor at forsegle evt. testboringer eller efterladte borehuller ved udstøbning med cement eller Storbæltsblanding.

Trinvis frakturering og injektion

I de dybeste fraktureringsintervaller i det udførte pilotforsøg blev der for hvert, forseglet interval først udført pneumatisk frakturering og dernæst tracerinjektion ved Liquid Atomized Injection. Ind imellem blev der indsamlet monitoringsdata vedr. trykudbredelsen fra testboringerne. Der var således i praksis en pause mellem de to trin på ca. 15-45 minutter. Opdelingen af processen i to trin blev foretaget for at muliggøre indsamling af feltobservationer vedr. trykudbredelsen samt jordhævningen under begge procestrin og i samtlige filtre under fraktureringen. Sidstnævnte ville ikke være muligt ved udførelse af processen i ét trin med mindre der var tilstrækkeligt med manometre med packere til at installere i samtlige filtre. Pga. risiko for opblæsning af tracer, kan der ikke monitoreres vha. plastikhandsker under tracerinjektionen, men kun under fraktureringen.

Udover indsamling af trykudbredelsesdata, giver en trinvis proces også operatøren bedre mulighed for indledningsvist at få en fornemmelse af den lokale geologi og dermed kunne optimere processerne vha. tryk og flow af gas. Dette kendskab til geologien kan etableres ud fra de(t) første fraktureringsinterval(ler) eller ved en test uden for behandlingsområdet.

Hvad der sker med sprækkerne i pausen mellem de to processer er ikke belyst, men det vurderes umiddelbart realistisk, at en vis andel af de skabte sprækker lukker sig igen inden tracerne injiceres. Herved er der en risiko for, at tracerudbredelsen bliver mindre end hvis tracerinjektionen var udført i umiddelbar forlængelse af fraktureringen.

Det vurderes således, at når operatøren er blevet bekendt med de lokale geologiske forhold, vil det være fordelagtigt at udføre frakturering og tracerinjektion i ét trin for at opnå den bedst mulige fordeling af stof i formationen.

Moniteringsboringer	Til dokumentation af tracerfordelingen som følge af pilotforsøget er der etableret en række moniteringsboringer. Boringerne er udført som uforede tørrotationsboringer med snegl, der er filtersat i tre niveauer. Boringerne er udført uden foring af tidshensyn, da geologien i boringerne under borearbejdet fremstod som helt fast moræneler uden synlige vandførende horisonter. På baggrund af vandprøver udtaget fra boringerne vurderes det dog sandsynligt, at der er sket en krydskontaminering under filtersætningen. Det anbefales således at udføre filtersatte boringer med foring. Såfremt boringerne alene udføres med henblik på at udtage vandprøver, vurderes niveauspecifikt installerede sugeceller at være at foretrække, uanset boremetode, idet risikoen for krydskontaminering herved minimeres.
Styring af kvælstoftryk og -flow	Det anvendte reguleringsmodul fra ARS kunne regulere både flow- og tryk af kvælstofgassen inden for de intervaller der var nødvendige, og denne del af teknikken vurderes meget veludviklet. Selve leveringen af kvælstof under injektionen skete fra almindelige trykbeholdere koblet parallelt (10 stk. 50 l beholdere svarende til 200 m ³ N ₂). Ved fuldskala anvendelse af teknikken på en typisk grund vil der oftest skulle gennemføres frakturering i op til 10-20 boringer, og forbruget af kvælstof bliver relativt stort i forhold til det gennemførte pilotforsøg. Da af- og tilkobling og håndtering af disse flasker er relativt tidskrævende, kan det ved fremtidige fuldskala-projekter overvejes at anvende et såkaldt ”mobiltank”-anlæg, hvor flydende kvælstof omdannes til gasformig kvælstof på stedet.
Injektion af væsker med kvælstof-strømmen	Den anvendte pumpetype til injektion af den vandige tracerblanding fungerede udmærket og kunne uden problemer levere det nødvendige tryk. Der kan dog være behov for en pumpe med et højere flow end 25-50 liter/min, såfremt meget større væskevolumener end 50 liter ønskes injiceret i hver fraktureringsinterval. Et større flow ville endvidere kunne reducere den nødvendige injektionstid, i hvilken det genererede sprækkesystem skal holdes under konstant kvælstoftryk. Herved kan der opnås både en besparelse i kvælstofforbrug og tid.
Injektionsvæskens mængde, sammensætning og koncentrationer	Der bør løbende udtages prøver af injektionsblandingen, sikres opblanding i tanke og kontrol af volumener.

8 Diskussion

8.1 DOKUMENTATIONSMETODER

Der er anvendt en række forskellige dokumentationsmetoder på Vadsbyvej under og efter fraktureringen. Metoderne har haft forskellige formål som diskuteret i kapitel 3 under strategi for dokumentation. I det følgende afsnit vil forskellige aspekter vedr. metodernes anvendelighed blive diskuteret.

8.1.1 Dokumentationsmetoder under frakturering

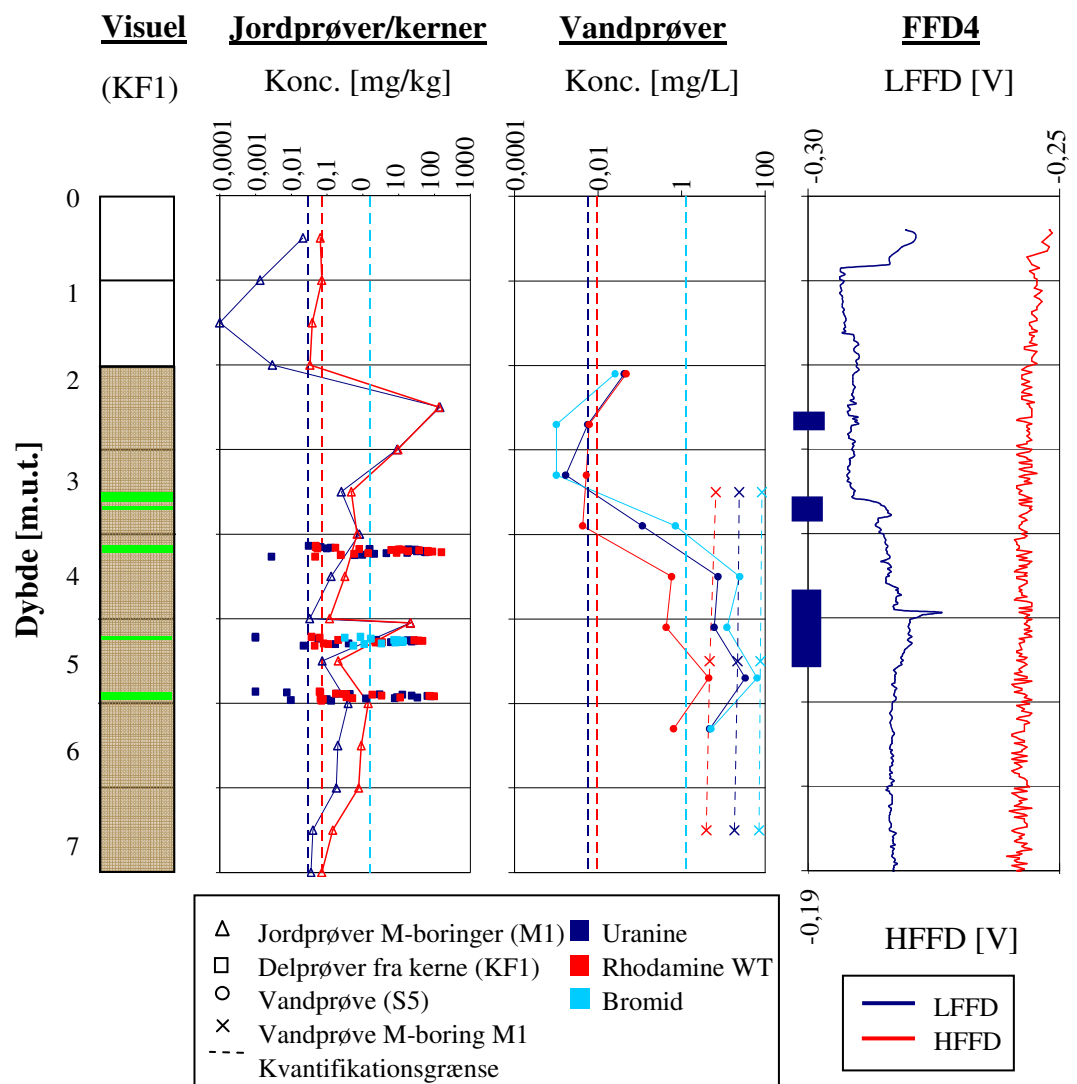
Metoderne under fraktureringen – trykudbredelse og jordhævning - har været diskuteret i bilag L. Begge metoder giver en umiddelbar registrering af ændringer under selve fraktureringen, og især trykudbredelserne giver et godt visuelt indtryk af udbredelsen af gassen i jorden. Den overordnede forplantning af trykbølgen i de fire observationsretninger er anvendelig for at vurdere influensradius og udbredelsesretning. Målinger af jordhævninger har i denne undersøgelse - som diskuteret tidligere - resulteret i to modstridende sæt data og kan reelt ikke vurderes. I forhold til kortlægning af udbredelsen og typen af sprækker, som er hovedformålet med denne undersøgelse, er trykudbredelsen svær at anvende. En kraftig trykpåvirkning kan ikke relateres direkte til det dannede sprækkenet. Hvis der ikke var sket opskydning af to af observationsboringerne kunne variationen i trykændringer måske have været omsat til variationen i sprækkenetværket over dybden.

8.1.2 Sammenligning mellem dokumentationsmetoder efter frakturering

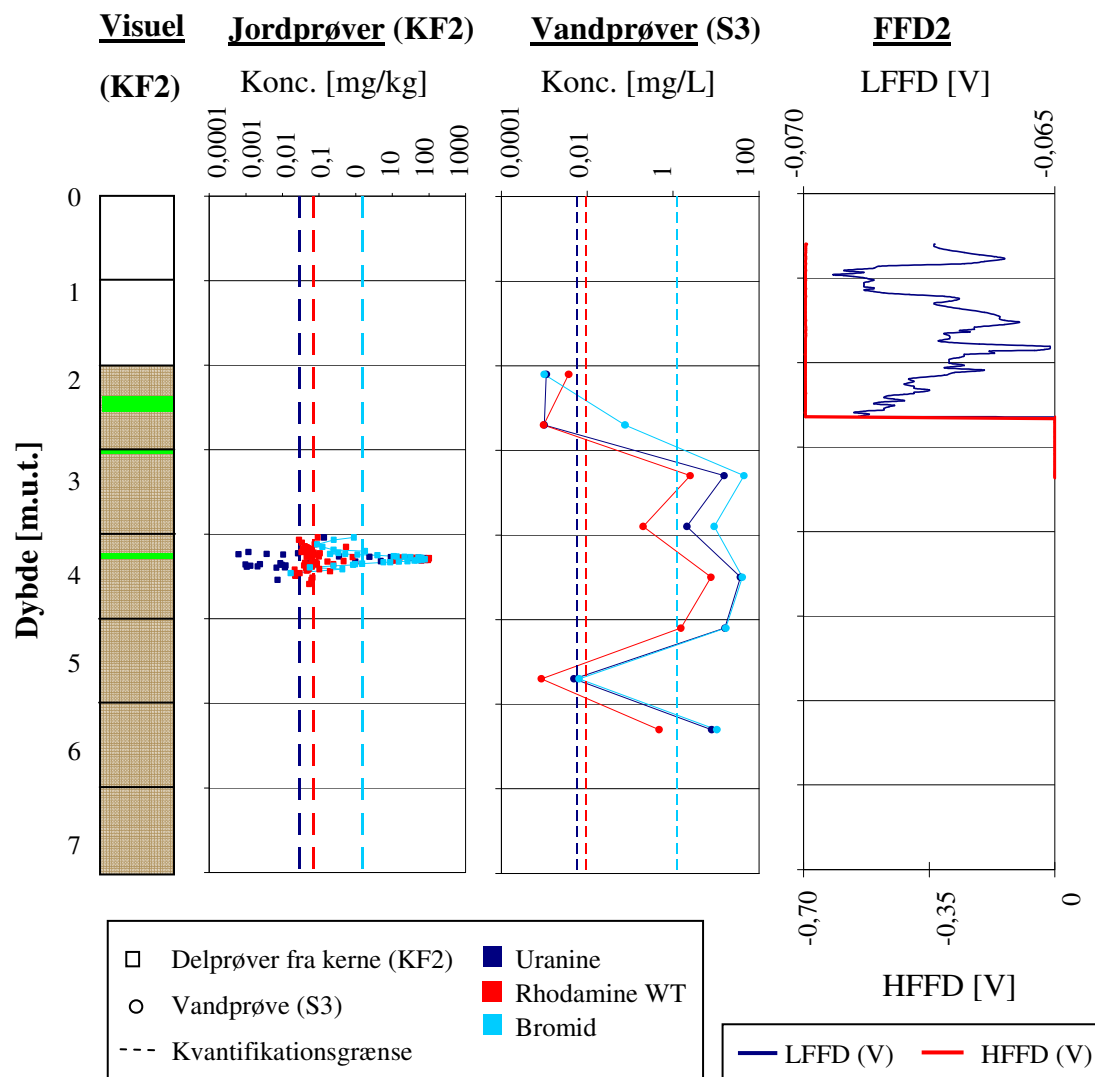
I figur 8.1, 8.2 og 8.3 er resultaterne af dokumentationsmetoderne: FFD, fotografering af kerner under UV-lys og analyser af jord- og vandprøver sammenlignet for undersøgelsespunkter beliggende i umiddelbar nærhed af hinanden, jf. bilag B.

Det skal bemærkes, at kernerne, FFD-sonderingerne og sugecellerne i visse tilfælde er placeret 0,5 – 1,5 m fra hinanden, hvilket kan have betydning ved en sammenligning af fundne tracerforekomster.

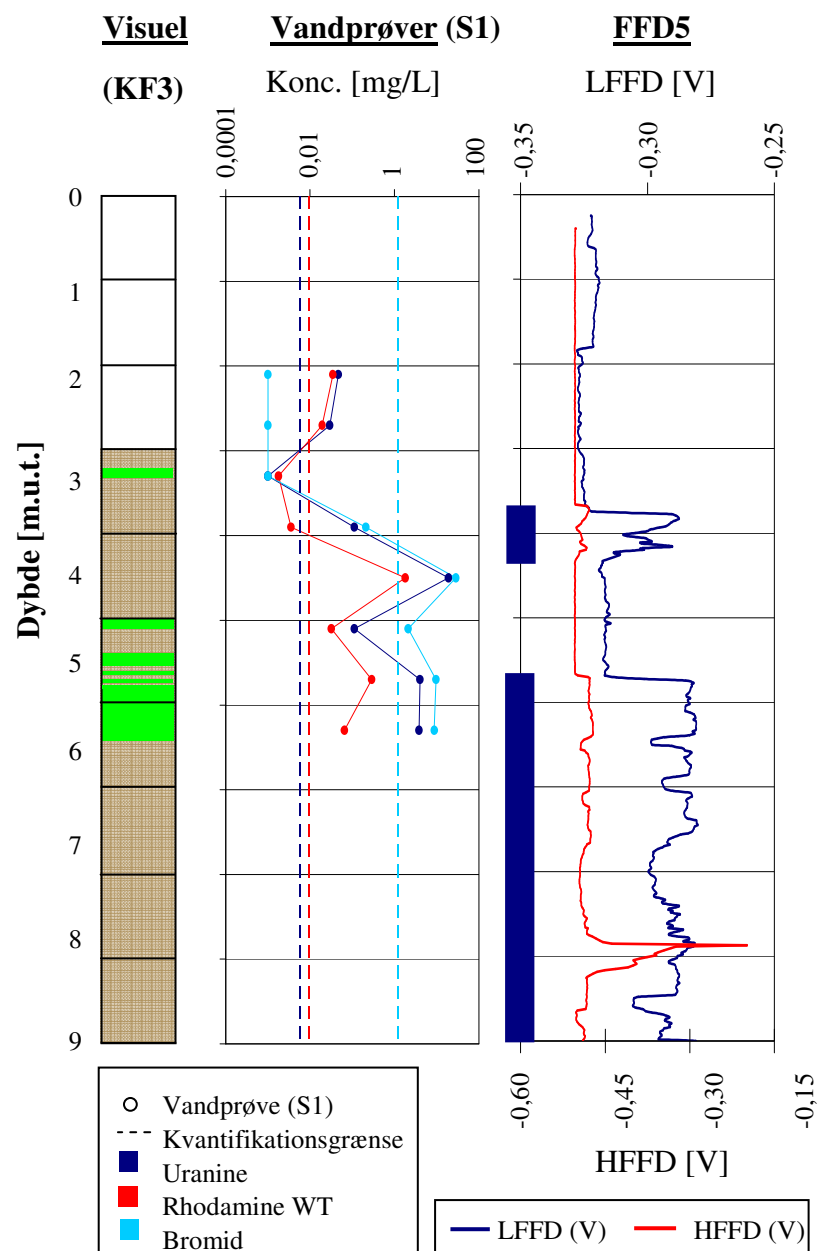
Som nævnt i afsnit 6.2.4, ses god overensstemmelse mellem fluorescence i kerner observeret under UV-lys og i delprøver udtaget fra detailområder i kernerne omkring disse fluorescerende områder.



Figur 8.1 Sammenligning af resultater fra visuel detektion af fluorescerende tracere under UV-lys (KF1), koncentration af fluorescerende tracere samt bromid i KF1 samt jordprøver fra M1, vandprøver fra S5 og M1 samt FFD-sondering FFD4. Observationerne er foretaget 3-3,5 m fra PF1. De mørkeblå markeringer på x-aksen på FFD-grafen angiver, hvor det vurderes, at tracer forekommer (jf. bilag J). De lysegrønne markeringer angiver forekomst af fluorescerende tracer.



Figur 8.2 Sammenligning af resultater fra visuel detektion af fluorescerende tracere under UV-lys (KF2), koncentration af fluorescerende tracere samt bromid i delprøver fra KF2 og vandprøver fra S3. Observationerne er foretaget 3,5 m fra PF1. De lysegrønne markeringer angiver forekomst af fluorescerende tracere.



Figur 8.3 Sammenligning af resultater fra visuel detektion af fluorescerende tracere under UV-lys (KF3), koncentration af fluorescerende tracere samt bromid i vandprøver fra S1 samt FFD-sondering FFD5. Observationerne er foretaget 1,5 m fra PF1. De mørkeblå markeringer på x-aksen på FFD-grafen angiver, hvor det vurderes, at tracer forekommer, jf. bilag J. De lysegrønne markeringer angiver forekomst af fluorescerende tracer.

For at vurdere resultatet af FFD-sonderingerne i forhold til fotografering af kernerne under UV-lys (visuel detektion) kan KF1 og FFD4 sammenlignes, da disse er beliggende med en indbyrdes afstand af 0,2 meter. Ligeledes kan FFD5 og KF3 sammenlignes, mens FFD 2 og KF2 ikke kan sammenlignes, da FFD2 blev stoppet af en sten.

Hvis de fluorescerende områder i FFD4 og KF1 sammenlignes (figur 8.1) ses, at FFD4 indikerer en forekomst af tracer i en dybde svarende til de fluorescerende områder detekteret ved fotografering under UV-lys.

For KF3 og FFD5 ses, jf. figur 8.3, en god sammenhæng mellem ca. 5,5 – 6,5 m.u.t. Under ca. 6,5 m.u.t. observeres ikke fluorescens i kernerne, mens FFD-sonderingen giver udslag fra ca. 5,5 til 10 m.u.t., hvor KF3-kernen har sit dybeste punkt. Ved ca. 3,4 m.u.t. er der i KF3-kernen observeret fluorescens, mens FFD-sonderingen indikerer en tilstedeværelse af fluorescerende tracer i ca. 3,8 – 4,2 m.u.t.

Således ses i nogle tilfælde god overensstemmelse mellem observationer foretaget med hhv. FFD-sonde og fotografering af kerner under UV-lys med hensyn til opsprækkede områder, men der er også eksempler på det modsatte. Generelt kan enkeltstående sprækkeobservationer ikke korreleres direkte mellem metoderne.

I figur 8.1 er den visuelle forekomst af tracer under UV-lys samt koncentrationen i KF1 afbildet sammen med koncentrationen i jordprøver fra M1 og vandprøver fra S5 og M1. Der ses overensstemmelse mellem tracerforekomsterne i S5 og KF1 fra 4 m.u.t. til 6 m.u.t. Tracerforekomsten i S5 er ikke afgrænset med det nederste filter i 6,3 m.u.t. I jordprøverne fra M1 findes tracer i ca. 2,5 m.u.t. og 5 m.u.t. Der er ligeledes observeret tracer ca. 5 m.u.t. Sidstnævnte kan også ses i fotografier af KF1-kernen under UV.

I figur 8.2 er resultater for KF2 og vandprøver fra S3 sammenstillet. Den observerede sprække ved 2,5 m.u.t. i KF2 kan ikke detekteres i S3. I vandprøver fra 3,3 – 5,1 m.u.t. er der fundet tracerkoncentrationer over kvantifikationsgrænsen. I samme dybdeinterval er der visuelt observeret et fluorescerende område ved 4,3 m.u.t.

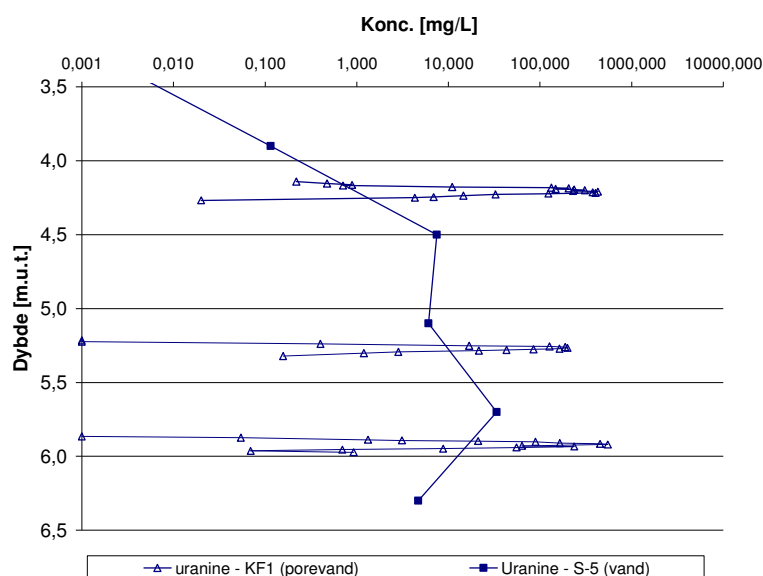
Der er god overensstemmelse mellem tracerforekomsten registreret i FFD5 og i vandprøver fra S1, jf. figur 8.3. Ved 3,4 m.u.t. er der visuelt registreret et fluorescerende område i KF3, som ikke kan spores i vandprøverne fra S1.

8.1.3 Sammenhæng mellem jordkoncentrationer og vandkoncentrationer

De anvendte metoder kan bruges til at kvantificere koncentrationerne enten i vandfasen eller i matrix. Det er interessant, hvordan koncentrationniveauer som observeres stemmer sammen, da det kan bruges i en fortolkning af f.eks. tracerfordeling, sorptionsforhold og massebalancer.

Koncentrationerne i jordprøverne fra M1 kan direkte sammenlignes med koncentrationerne i kerneprøverne i KF1 (se figur 8.1). Koncentrationerne i M-boringen er lavere end de højeste koncentrationer i kerneprøverne. Det tyder på, at der er tale om en vis homogenisering af koncentrationerne i M-prøverne, så M-boringerne måske giver et godt mål for middeldkoncentrationerne omkring et sprækkeområde. Det er dog svært at generalisere, da der ikke er flere samhörrende datasæt for M-boringer og kerneprøver.

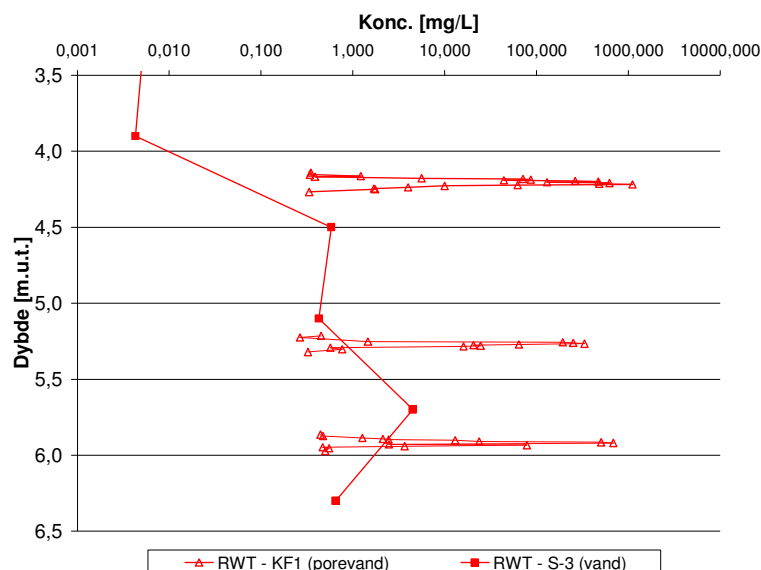
I figur 8.4, 8.5 og 8.6 er koncentrationen af hhv. uranine og rhodamine WT i vandprøver fra S5 sammenlignet med de udregnede porevandskoncentrationer for KF1 i intervallet 3,5- 6,5 m.u.t. Porevandskoncentrationerne er beregnet ud fra koncentrationer målt i deljordprøver fra detailområder i KF1-kernen uden hensyntagen til sorption (se bilag I). Det ses, at koncentrationen i vandprøverne udtaget fra S5 i dybderne svarende til de detekterede sprækker i KF1 ligger lavere end koncentrationen i porevandet i og omkring selve sprækken (figur 8.4, 8.5 og 8.6). Dette ses for alle tre tracere. Omregningen for rhodamine WT er dog vanskelig, da der sker en betydelig sorption (som der er set bort fra i omregningen).



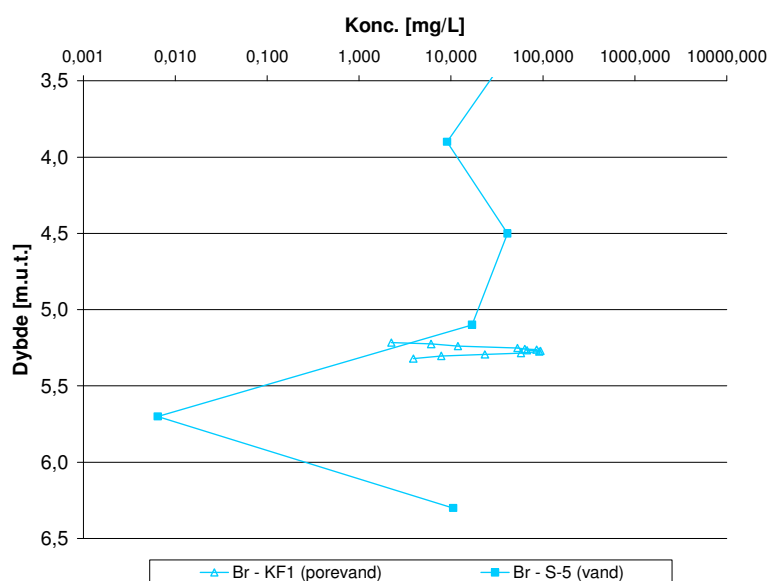
Figur 8.4 Uranine koncentrationen i vandprøver fra sugecelle S5 sammenlignet med porevandskoncentrationer i KF1 udregnet ud fra tracerkoncentrationer i deljordprøver i intervallet 3,5 – 6,5 m.u.t.

At koncentrationen i vandprøverne er mindre end koncentrationen i og omkring sprækken (i porevandet) kan således skyldes sorption. Det kan også skyldes, at vandprøven stammer fra et større interval, så koncentrationerne er midlet eller er udtaget i en dybde, hvor der ikke er direkte kontakt til sprækken i KF1. Samme tendens ses, hvis kon-

centrationerne af tracere for de resterende detailområder i kernerne omregnes til porevandskoncentrationer og sammenlignes med koncentrationer i vandprøver.



Figur 8.5 Rhodamine WT koncentrationen i vandprøver fra sugecelle S5 sammenlignet med porevandskoncentrationer i KF1 udregnet ud fra tracerkoncentrationer i deljordprøver i intervallet 3,5 – 6,5 m.u.t.



Figur 8.6 Bromid koncentrationen i vandprøver fra sugecelle S5 sammenlignet med porevandskoncentrationer i KF1 udregnet ud fra tracerkoncentrationer i deljordprøver i intervallet 3,5 – 6,5 m.u.t.

8.1.4 Prøvetagningsmetode, skala og detektion

I tabel 8.1 er metoderne efter fraktureringen sammenlignet med hensyn til prøvetagningsmetode, skala, kvantifikationsgrænse og anvendte

tracere. Udgangspunktet for vurderingerne i det følgende har været geologien på Vadsbyvej med en meget fast, sandet – og stenet - moræner. I forhold til danske forhold er det en typisk moræne, men mængden af sten er muligvis større end normalt.

Tabel 8.1 Sammenligning mellem dokumentationsmetoder anvendt efter fraktureringen.

Detektionsmetode	Prøvetagningsmetode	Skala	Kvantifikationsgrænse	Tracere			
				Uranine	Rhodamine WT	Optisk hvidt	Bromid
Detektion af sprækker ved fotografering i UV-lys	Kerneprøver	Ø38 mm	1 – 10 mg uranine/kg	X	X	X	
	Boringer	Ø200 mm					
Detektion af sprækker i dagslys i felten	Boringer	Ø200 mm	Skønnet 10-100 mg uranine/kg	X	X		
FFD-sonderinger			Lab.: 1000 mg/L Felt: Ej estimeret ^a	X	X	X	
Vandprøver	Sugeceller	L 15 cm	Uranine: 0,006 mg/L Rhodamine WT: 0,01 mg/L	X	X		X
	Boringsfiltre	L 100 cm	Bromid: 1,25 mg/L				
Jordprøver	Kerneprøver	Ø38 mm	Uranine: 0,03 mg/kg Rhodamine WT: 0,07 mg/kg	X	X		X
	Boringer	Ø200 mm (8")	Bromid: 1,57 mg/kg				

^a Der er ikke foretaget en undersøgelse af kvantifikationsgrænsen for FFD-sonderingerne udført i felten.

De enkelte metoder adskiller sig på en række væsentlige punkter. FFD-sonderingen er en indirekte metode, som kræver en fortolkning af respons i forhold til at fastlægge forekomsten af tracer. Alle øvrige metoder er direkte metoder, men de har meget forskellige detektionsgrænser (se tabel 8.1). De analytiske metoder har de laveste detektionsgrænser, mens FFD-sonderingen har den højeste. Fordelen ved FFD-sonderingen er, at det er en billig metode, som giver et umiddelbart svar i felten på mulig forekomst af tracer. Observationer på jordprøver giver også et hurtigt svar i felten, mens de øvrige analytiske metoder tager længere tid. Fotografering/direkte observation under UV-lys giver også et hurtigt svar, men kræver mørkekammerfaciliteter og UV-lampe.

Vandprøver fra sugeceller (se figur 8.4, 8.5 og 8.6) repræsenterer formentlig en blanding af vand fra sprækker og matrix. Vandprøverne i M-boringerne integrerer koncentrationen af et længere interval end sugecellerne på grund af filterlængden (1 m contra 0,15 m). Samtidig er der dårligere kontakt mellem formation og filter på grund af gruskastningen, som også giver problemer med renpumpning i en lavtydende formation.

Kerneprøverne har en meget lille diameter, hvilket giver en større sandsynlighed for at "overse" et spredt netværk af enkeltstående sprækker. Jordprøver fra boringer omfatter et areal, der er ca. 30 gange større og dermed også en større sandsynlighed for at fange vertikale eller subvertikale sprækker. Hvis der er tale om større sammenhængende naturlige sprækkesystemer (som de sprækker der er observeret i udgravningen) vil begge metoder formentlig fange udbredelsen. Fordelen ved kerneprøverne er at der kan etableres profiler med den præcise koncentrationsfordeling omkring sprækken, da prøven er "næsten" intakt.

8.1.5 Evaluering af de enkelte metoder

Fotoregistrering under UV-lys

Fotografering og belysning af kerner med UV-lys giver et hurtigt overblik over det dannede sprækkenetværk. De fluorescerende områder ses tydeligt visuelt ned til koncentrationer på 1-10 mg/kg uranine. Processen er let udførlig og hverken dyr økonomisk eller tidskrævende. Belysning med UV-lys giver ved delprøvetagning af jordprøver fra kernen prøvetageren mulighed for at udtage prøver i/omkring et område, hvor der med sikkerhed forefindes tracer. Indledende forsøg viste, at opskæringen og fotograferingen af kernerne skulle ske inden for 48 timer efter fraktureringen pga. tracernes "holdbarhed", men fluorescence er observeret 78 dage efter fraktureringen på Vadsbyvej.

FFD-sondering

FFD-sondering vurderes at give en noget usikker identifikation af dybder med fluorescerende tracer. Fortolkningen af resultaterne er vanskelig og baggrundsniveauet svinger mellem FFD-sonderingerne. Kvaliteten af data kan styrkes ved flere sonderinger i tilknytning til andre metoder og supplerende forsøg omkring respons i laboratoriet. Metoden egner sig ikke til stærkt stenede jorde.

Jordprøver fra kerner

Delprøvetagning af kerner til analyse for fluorescerende tracere og bromid giver en stor detaljeringsgrad. Ved en kombination med UV-belysning af kerner kan delprøvetagningen målrettes til områder omkring fluorescerende områder. Endvidere er detektionsgrænsen ved analyser lavere end den visuelle detektionsgrænse under UV-lys.

Jordprøver fra boringer

Jordprøver fra opboring af M-boringer giver et godt visuelt billede i felten af berørte områder og kan suppleres med fotografering under UV-lys. Der kan foretages analyser i laboratoriet og metoden er sam-

let et godt værktøj til at vurdere både strukturer og koncentrationer. Metoden er ikke egnet til en detailvurdering af koncentrationsfordeling omkring den enkelte sprække.

Vandprøver fra boringer	Hovedparten af vand opsamlet i M-boringerne formodes, pga. det lange filter på 1 meter, at stamme fra det dannede sprækkenetværk. Der er formentlig sket krydskontaminering under installationen. Vandprøverne kan derfor i dette tilfælde kun anvendes til at vurdere den horisontale udbredelse, således at boringer med høje koncentrationer afspejler afstande med større påvirkning end boringer med lave koncentrationer. Anvendelse af foring ved boringsudførelsen kunne formentlig have forbedret udbyttet af M-boringerne.
Vandprøver fra sugeceller	Sugecellerne giver information om tracerforekomsten i forskellige dybder. Hver sugecelle er installeret i hver sin boring, hvorfor risikoen for krydskontaminering inden for en sugecelleklynge er elimineret. Der er minimalt gruskastningsvolumen og god kontakt til formationen. Metoden er velegnet til lavtydende formationer.
Sammenfatning	Samlet vurderes, at fotografering af kerner under UV-lys, fluorescensanalyser af delprøve af kerner, jordprøver (feltobservationer), fluorescensanalyser af jordprøver samt vandprøver fra sugeceller har været de bedst egnede og mest anvendelige dokumentationsmetoder ved fraktureringen på Vadsbyvej.

De mest anvendelige dokumentationsmetoder supplerer hinanden som diskuteret med hensyn til skala og detektionsgrænser.

8.2 TRACERE

Der er til dokumentation af den pneumatiske frakturering anvendt fem forskellige tracere. Fire af tracerne; uranine, rhodamine WT, bromid og optisk hvidt har været anvendt ved de forskellige felt- og laboratoriemetoder, som er blevet præsenteret i de forrige afsnit. Methylenblåt har kun været anvendt til dokumentation af sprækker i forbindelse med den nærliggende udgravning /3/ og vil derfor ikke blive diskuteret i denne rapport.

Uranine	Uranine har vist sig at være meget velegnet til fotodokumentation under UV-lys efter kort tid (få dage). Det er især uranine, der dominerer under UV-lys, og den karakteristiske farve har gjort det meget let at identificere områder med tracer under UV-lys. Uranine kan også observeres i dagslys, men her er responset væsentlig ringere. Den beregnede visuelle detektionsgrænse for uranine under UV-lys gør også metoden velegnet som værktøj til at udvælge prøver til efterfølgende analyser.
---------	---

Uranine kan analyseres på fluorometer over et meget bredt spænd af koncentrationer (op til 0,25 mg/l) og pålidelig kvantifikation er mulig ned til 0,006 mg/l. Håndteringen af vandprøver er enkel, og den udviklede ekstraktionsmetode til jordprøver fungerer tilfredsstillende. Der er en meget fin overensstemmelse mellem målinger og observation under UV-lys. Baggrundsfluorescensen fra jorden ved måling af uranine er lav.

Rhodamine WT

Rhodamine WT har vist sig at være et godt supplement til uranine i forbindelse med fotodokumentation. Det er som sagt uranine som dominerer, og det er vanskeligt at vurdere værdien af rhodamine WT uden uranine.

Rhodamine WT kan analyseres på fluorometer over et meget bredt spænd af koncentrationer (op til 0,25 mg/l efter fortynding) og pålidelig kvantifikation er mulig ned til 0,01 mg/l. Håndteringen af vandprøver er enkel, og den udviklede ekstraktionsmetode til jordprøver fungerer tilfredsstillende. Der er en meget fin overensstemmelse mellem målinger og observation under UV-lys.

Holdbarhed af uranine og rhodamine WT

De indledende undersøgelser viste, at der kunne være problemer med reduktion af uranine og rhodamine WT responset efter nogle dage. I praksis har det ikke vist sig at være et problem ved observationerne umiddelbart efter fraktureringen, hvor der var et fint respons. Ved UV-belysning af udvalgte kerner (hvor der i december blev påvist fluorescens) foretaget 78 dage efter fraktureringen sås stadig et respons for nogle sprækker, mens der ikke visuelt kan ses fluorescens ved andre sprækker. I kerner, hvor der efter 78 dage visuelt kan ses fluorescens, er det rhodamine WT som primært kan detekteres. Enkelte steder sås et svagt fluorescens fra uranine. Den korte holdbarhed ved de indledende forsøg kan skyldes, at de penslinger af tracer, som blev udført ikke var repræsentative for den spredning som atomiseringsmetoden gav anledning til. Ved håndtering af kerner efter fraktureringen blev muligheden for fotokemisk henfald af uranine elimineret ved så vidt muligt at holde kerneprøverne tildækkede.

Bromid

Bromid er en af de mest benyttede tracere ved feltundersøgelser i jord- og grundvand, da den er let at analysere, ikke forekommer naturligt og kun sorberer ganske lidt - hvis overhovedet. Anvendelsen i denne undersøgelse har bekræftet disse forhold. Analyse-mæssigt har jordprøverne dog givet nogle problemer, da det har været besværligt at separere vand og jord ved filtrering/centrifugering, så der kunne opnås en anvendelig prøve til analyse. Kvantifikationsgrænsen er også højere for bromid end for de øvrige tracere, hvilket primært skyldes, at den analyse-mæssige detektionsgrænse er meget højere for bromid end for de fluorescerende tracere. Ulempen ved bromid er desuden, at den

ikke er synlig, så der ikke kan foretages udvælgelse af prøver på baggrund af forventninger ved visuelle observationer.

Sorption

Rhodamine WT sorberer meget i forhold til uranine og bromid. Bromid har vist sig at sorbere mindst af de tre tracere, der er kvantificeret. Anvendelsen af stoffer med forskellige sorptionsegenskaber har fordele i forhold til analyser på jord- og vandprøver. Stoffer som kun i ringe grad sorberer vil overvejende findes i vandprøver, hvilket gør bromid og uranine meget anvendelige ved analyser af vandprøver. Ved vandprøverne findes rhodamine WT generelt i lavere koncentrationer end uranine og bromid (se f.eks. figur 6.18), så detektion af rhodamine WT i vandprøver vil sandsynligvis efter længere tid være vanskelig. Omregning mellem jord- og vandprøver for sorberende stoffer er også vanskelig, da det kræver et godt kendskab til den aktuelle fordelingskoefficient (K_d) for det pågældende stof.

I forbindelse med vurdering af tracerudbredelsen omkring sprækkerne er det en fordel med et sorberende stof som rhodamine WT, da koncentrationen af stoffet vil vedblive med at være høj tæt ved sprækken i modsætning til bromid, hvor der hurtigere vil ske en udviskning af koncentrationsprofilen (figur 6.11). Dette forhold er tydeligt dokumenteret ved de teoretiske beregninger af diffusion og sorption i matrix (bilag G). Der vil kunne hentes endnu mere information ud af sådanne data, hvis der udføres bestemmelse af den konkrete K_d -værdi for moræneleren på lokaliteten. Observationerne efter 78 dage tyder på, at den sorberede fraktion af rhodamine WT helt eller delvist kan ses under UV-lys.

Optisk hvidt

Optisk hvidt har ikke i samme omfang som de øvrige tracere indgået i laboratorieundersøgelserne. Der er heller ikke opnået erfaringer med fotografering af optisk hvidt under UV-lys. Erfaringerne fra litteraturen og FFD-sonderingerne i felten tyder på, at optisk hvidt kan registreres med de anvendte sonder, men der mangler en egentlig dokumentation under velkontrollerede forhold i laboratoriet.

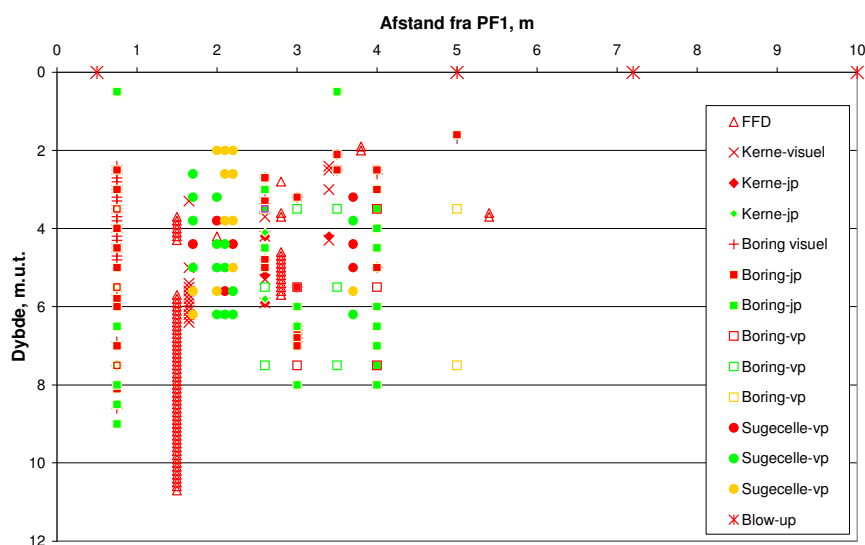
Sammenfatning

Samlet set supplerer bromid, uranine og rhodamine WT hinanden vældig godt ved en kombineret anvendelse af fotodokumentation og analyser på jordprøver, kerneprøver og vandprøver. Optisk hvidt kan være et godt supplement, hvis der etableres dokumentation for stoffets respons i forhold til den anvendte detektor. Det vil være interessant, hvis der også kunne foretages direkte analyser af koncentrationsniveauet for optisk hvidt. Det er en klar fordel med flere tracere, så de forskellige respons kan sammenlignes. Interferens mellem tracerne har ikke været noget problem.

8.3 SPRÆKKEUDBREDELSE

8.3.1 Overordnet tendens for fordeling af tracer

I figur 8.7 er vist alle data plottet som funktion af afstand og dybde fra fraktureringsboringen PF1, uanset retning. Der er vist forskellig signatur afhængig af hvilken data-type, der er repræsenteret på plottet. Data er plottet i tre farver: rød svarer til de høje målte tracerkoncentrationer (10-1000 mg/l i porevandet og 1-1000 mg/kg i jorden), de visuelle detektioner samt udslag på FFD-sonden, grøn svarer til de signifikante, men ikke visuelt detekterbare koncentrationer (0,1-10 mg/l i porevand og 0,1-1 mg/kg i jorden), mens gul svarer til koncentrationer, der alene kan detekteres i vandprøver (0,006-0,1 mg/l i porevand).



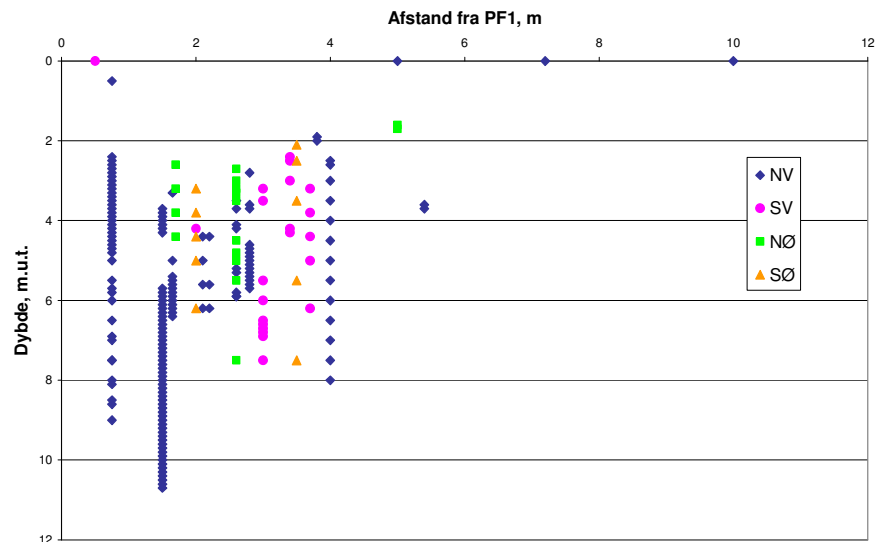
Figur 8.7 Alle data fra samtlige retninger som funktion af afstand fra PF1, dybde og koncentration

Figur 8.7 viser følgende overordnede tendenser:

- De fleste observationer med høje koncentrationer eller visuel detektion ligger i området mellem 2,5-7 m.u.t. og inden for en radius på 4 meter fra fraktureringsboringen.
- Tæt på PF1 har tracer spredt sig vertikalt uden for fraktureringsintervallet (3-8 m.u.t.): Der er observeret tracer (og målt i jordprøver) i M3 fra 2,4 m.u.t. og under 8 m.u.t. er der dels visuelt observeret tracer i M3 ned til 8,2 m.u.t., der er målt indhold af tracer i M3 ned til 9 m.u.t. og der er registreret udslag FFD5 ned til 10,8 m.u.t. M3 er beliggende 0,75 m fra PF1 og FFD5 er placeret 1,5 m fra PF1.

- Der ses en tendens til at sprækkerne søger opad mod terræn. En-ten spredes de naturligt som en skål-facon, eller de spredes hori-sontalt og rammer naturlige vertikale eller subvertikale sprækker.

Det bemærkes, at der er stor forskel i datatætheden i forskellige ret-ninger fra PF1 samt at der næsten ingen data er længere væk end 5 meter fra PF1, svarende til den forventede influensradius. Den ret-ningsbestemte forskel i datatætheden er søgt illustreret i figur 8.8, der er en variant af figur 8.7.



Figur 8.8 Alle data som funktion af afstand, dybde og retning

Det laveste koncentrationsniveau fra figur 8.7 er ikke medtaget i figur 8.8. De to højeste koncentrationsniveauer er vist med samme signatur, ligesom der ikke er skelnet mellem datatype. Samtlige data er opdelt i fire dele af testfeltet, afgrænset af hhv. nord, øst, syd og vest.

Det ses af figuren, at langt den største datatæthed er i NV-kvadranten, mens datagrundlaget i SØ-kvadranten er noget sparsomt.

8.3.2 Observeret tracerforekomst og vurderet sprækkeudbredelse

De indsamlede data er afbilledet detaljeret på fire profilsnit igennem testfeltet, vist på figur 8.9-8.12 og vedlagt i bilag M. Situationsplan med placering af profilsnittene er ligeledes vedlagt i bilag M. Data på profilsnittene er ligesom for figur 8.7 afbilledet med tre forskellige farver afhængig af det koncentrationsniveau, de repræsenterer: Rød angiver de højeste koncentrationer, grøn det mellemste koncentrationsniveau og gul de lavere koncentrationer af tracere. En beskrivelse af retningslinierne for optegningen af de fire profilsnit er vedlagt i bilag M.

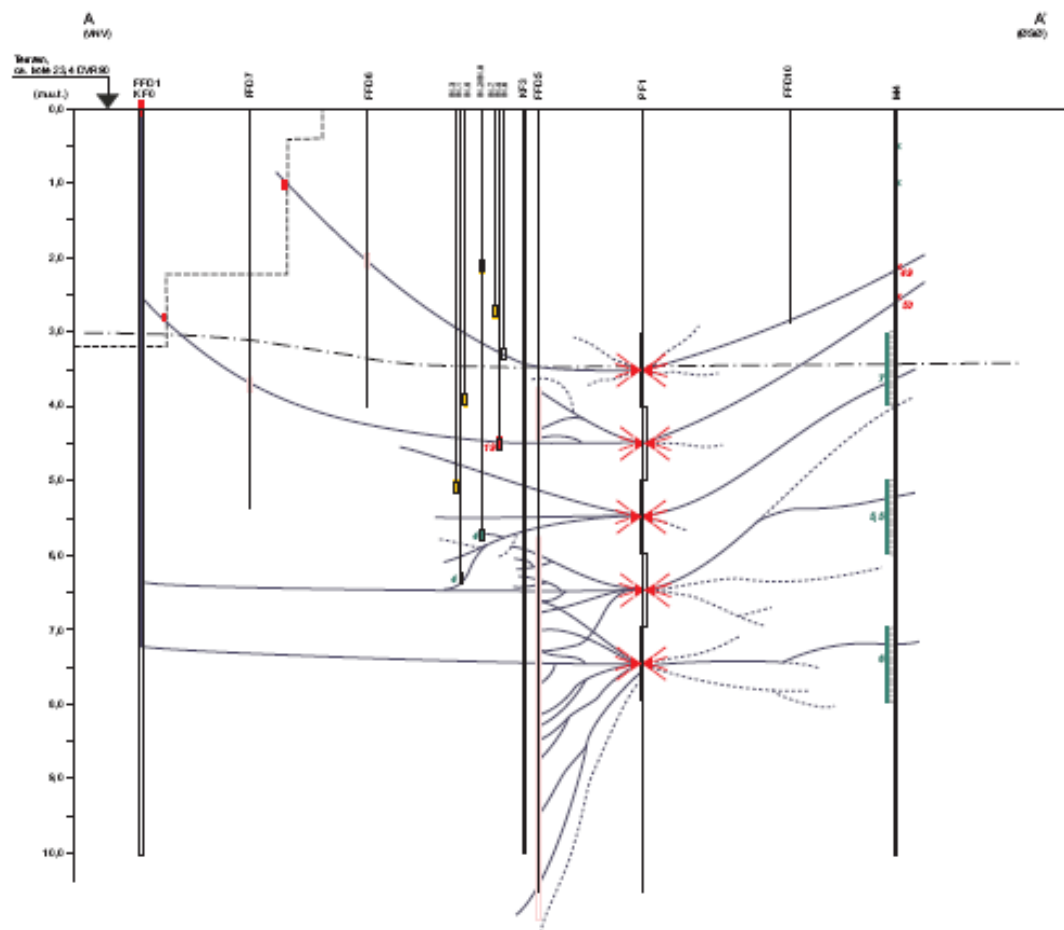
På profilsnittene er der søgt skitseret mulige sprækkeudbredelser. Disse er vurderet på baggrund af de observerede tracerforekomster.

Profil A-A'

Profilsnit A-A' gennemskærer testfeltet fra NV-kvadranten (VNV) til SØ-kvadranten (ØSØ). I den venstre del af profilet (NV-kvadrant) er der detekteret tracer både visuelt i KF3, i udgravningen og ved udslip på terræn (KF0), som udslag på FFD-sonden (FFD5, FFD6 og FFD7) samt i vandprøver fra sugeceller (S1). Endvidere er der fundet forhøjet indhold af tracere i vandprøver fra sugeceller 5,6-6,35 m.u.t (S1-1 og S1-2). I den højre del af profilet (SØ-kvadrant) er der alene data fra boring M4, hvor der visuelt er detekteret tracer 2-2,5 m.u.t. Herunder er der ikke detekteret tracer i signifikante koncentrationer i jordprøver. Der er fundet forhøjet indhold af tracer i vandprøverne (5,5-7 mg uranine/l), men som diskuteret i afsnit 6.2.6 og 8.1.5, kan det ikke entydigt fastslås, at dette afspejler koncentrationsniveauet i den omgivende matrix. Tracerforekomsterne i en ØSØ-lige del af profilet er således væsentlige færre end på den VNV-lige side af PF1. Det bør dog bemærkes, at datatætheden på VNV-siden er ulige meget større end på ØSØ-siden, hvorfor en direkte sammenligning er behæftet med tilsvarende usikkerhed.

På baggrund af de beskrevne observationer samt feltobservationer vedr. trykudbredelse og tracerudslip på terræn, er det forsøgt skitseret på profilet hvilke sprækker og sprækketyper, der kan have givet anledning til den observerede hhv. målte forekomst af tracer.

VNV for PF1 vurderes der som minimum at være tre distinkte sprækker, der trykaflastes i KF0 (6,8 m fra P1), hvoraf den ene skønnes at skære FFD7 samt den dybeste af de to sprækker observeret i udgravningen. Antallet og tætheden af evt. forgreninger til disse sprækker kendes ikke. Fra det øverste fraktureringsinterval vurderes der at være en distinkt sprække, der skærer KF3, FFD6 samt den øverste af de to sprækker observeret i udgravningen (4,7 m fra PF1). For begge de sprækker der er observeret i udgravningen gælder det, at de i en eller anden afstand mellem PF1 og udgravningen har ramt en naturlig, hydraulisk aktiv sprække, som traceren derefter har spredt sig i.



Figur 8.9 Profil A-A'. Det detaljerede profilsnit findes i bilag M.

Tættere på PF1 ses både et forhøjet udslag i FFD5 fra 5,7-10,8 m.u.t. samt en mere diffus, men markant forekomst af tracer i KF3 (6-6,45 m.u.t.). Disse observationer kunne indikere, at der er dannet et tættere net af sprækker nær PF1 end observeret i større afstand. Det bemærkes, at der, trods den tætte beliggenhed mellem FFD5 og KF3, ikke er overensstemmelse mellem responset i FFD5 og det visuelt observerede respons i KF3 under 6,45 meters dybde.

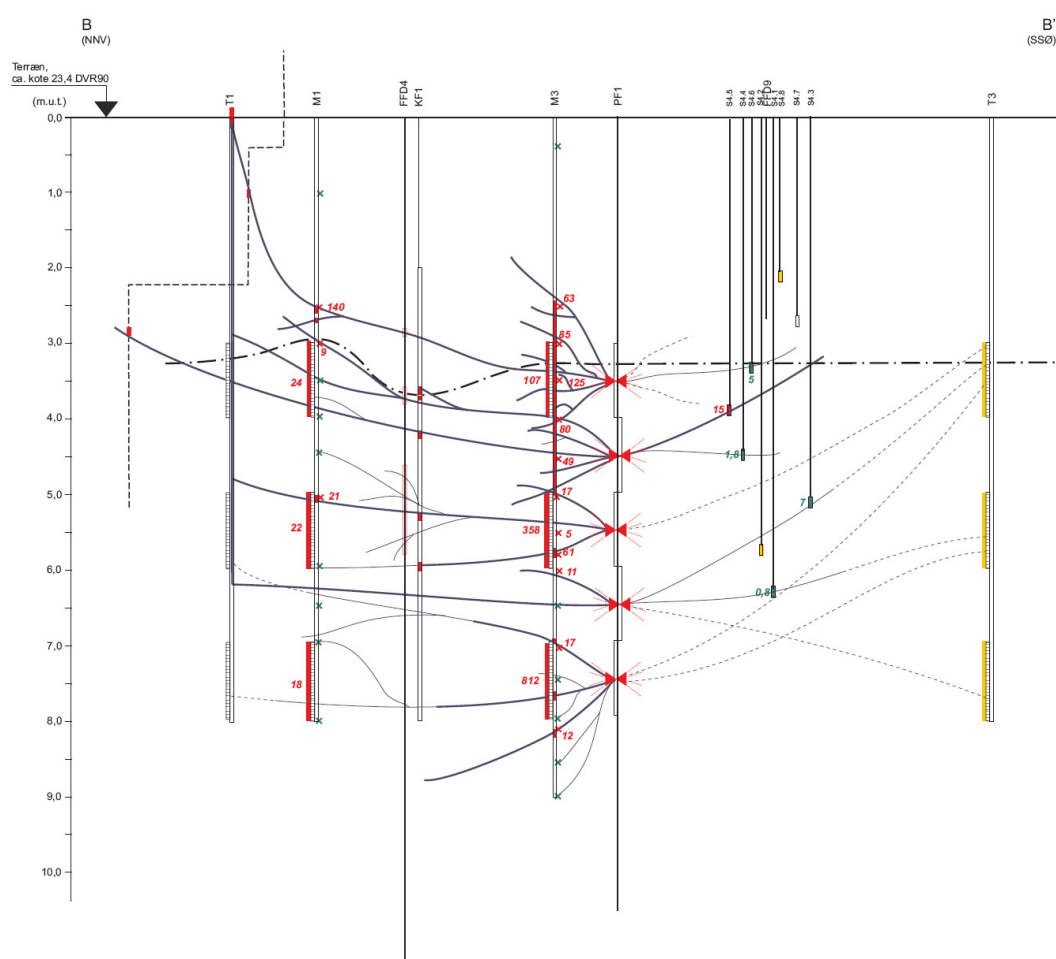
I vandprøverne fra S1-1 og S1-2 er der påvist forhøjede tracerkoncentrationer, hvilket kunne skyldes forekomst af tyndere sprækker eller forgreninger til hovedsprækker ved disse sugeceller.

Mellem 3-6 m.u.t. er der i flere dybder observeret distinkte sprækker i K3, markant forhøjet koncentration i S1-4 samt udslag i FFD5. Mellem de distinkte sprækker observeret i KF3 er der ikke visuelt observeret tegn på tracer. Der er dog ikke foretaget jordanalyser i det mellemliggende interval. Dette indikerer, at der i denne dybde måske i højere grad forekommer distinkte sprækker end forgrenede sprækkenetværk.

ØSØ for PF1 vurderes der at være minimum to distinkte sprækker, der skærer M4 2-2,5 m.u.t. Derunder kan der muligvis være dannet et antal tyndere sprækker, der forårsager et forhøjet koncentrationsniveau i vandprøverne fra M4, men datagrundlaget er som nævnt ikke tilstrækkeligt til at underbygge dette, idet disse vandprøver kan være forårsaget af afsmitning fra sprækkerne i 2-2,5 m.u.t. i forbindelse med filter-sætningen. Omvendt kan det ikke afvises, at der i dette område er et større antal tracerforekomster end detekteret pga. den begrænsede datatæthed.

Profil B-B'

Problematikken omkring datatæthed gør sig også gældende for profil B-B', idet dette profilsnit gennemskærer testfeltet fra NV-kvadranten (NNV) til SØ-kvadranten (SSØ), hvor data er relativt sparsom.



Figur 8.10 Profil B-B'. Det detaljerede profilsnit findes i bilag M.

I den venstre del af profilet (NV-kvadrant) er der detekteret tracer både visuelt i M3, KF1, M1, i udgravningen og ved udslip på terræn (T1), som udslag på FFD-sonden (FFD4) samt i jordprøver fra M1 og M3. Endvidere er der fundet forhøjet indhold af tracere i vandprøver fra M1 og M3.

I den højre del af profilet (SØ-kvadrant) er der alene data fra sugecellerne S4, hvor der er fundet markant forhøjede koncentrationer i én sugecelle og forhøjede koncentrationer i 4 sugeceller samt fra trykobservationerne i T3 under fraktureringen.

På baggrund af de beskrevne observationer samt feltobservationer vedr. trykudbredelse og tracerudslip på terræn, er det forsøgt skitseret på profilet hvilke sprækker og sprækketyper, der kan have givet anledning til den observerede hhv. målte forekomst af tracer.

NNV for PF1 vurderes der som minimum at være fire distinkte sprækker, der trykaflastes i T1, hvoraf den ene skønnes at skære FFD4, M1 samt den øverste af de to sprækker observeret i udgravningen. Endvidere vurderes der at være yderligere minimum én distinkt sprække, der passerer T1 og ses som den dybeste af de to sprækker observeret i udgravningen. Antallet og tætheden af evt. forgreninger til disse sprækker kendes ikke.

I M3, placeret 0,75 m fra PF1 er der i dybden observeret markant, men ikke-kontinuert forekomst af tracer i hele dybden 2,4-5 m.u.t. og jordkoncentrationerne i resten af boringen 5-9 m.u.t. er signifikant forhøjede. Under 5 m.u.t. observeres der visuelt i M3 fire dybder med distinkte sprækker. Observationerne i M3 indikerer, at der tæt på PF1 er et helt tæt net af sprækker.

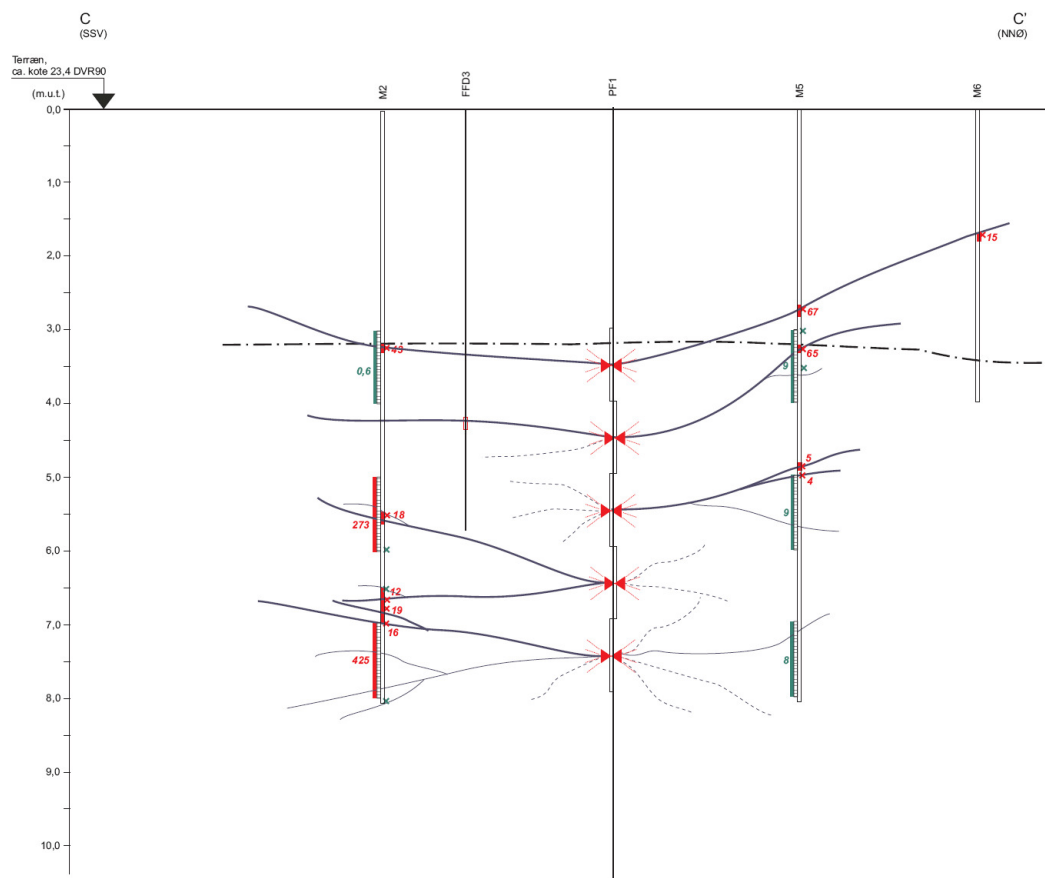
I KF1, placeret 2,5 m fra PF1 ses der ligeledes distinkte sprækker i fire dybder mellem 3,5-6 m.u.t. Disse sprækkeforekomster stemmer fint overens med udslagene i FFD4.

I M1, placeret 4 m fra PF1, er der observeret distinkte sprækker omkring 2,5-3 m.u.t. samt 5 m.u.t. Uden for de visuelt observerede tracerforekomster og ned til 7 m.u.t. er koncentrationerne i jordprøverne signifikant forhøjede. Dette kunne indikere, at der i dybden 3-7 m.u.t. forekommer et antal tyndere sprækker eller forgreninger til hovedsprækkerne, der ikke kan ses, men alligevel giver anledning til forhøjede indhold i jorden.

SSØ for PF1 vurderes der at være minimum én distinkt sprække, der skærer S4-5 ca. 3,8 m.u.t. Derunder vurderes der at være et antal tyndere sprækker, der forårsager et forhøjet koncentrationsniveau i vandprøverne fra S4-1, -3, -4 og -6. Trykobservationerne i T3 under fraktureringen indikerer, at der er skabt forbindelse mellem de tre nederste fraktureringsintervaller og alle tre filtre i T3. I hvor høj grad tracerudbredelsen har fulgt trykudbredelsen i dette tilfælde er ikke klart pga. den lave datatæthed i denne retning.

Profil C-C'

Profilsnit C-C' gennemskærer testfeltet fra SV-kvadranten (SSV) til NØ-kvadranten (NNØ).



Figur 8.11 Profil C-C'. Det detaljerede profilsnit findes i bilag M.

I den venstre del af profilet (SV-kvadrant) er der detekteret tracer visuelt i M2, som udslag på FFD-sonden (FFD3) samt i jord- og vandprøver fra M2.

Der vurderes at være minimum fire distinkte sprækker, der dels ses i boring M2 (3,2 m, 5,5 m og 6,5-7 m.u.t.), dels giver udslag på FFD4 i ét niveau (ca. 4,2 m.u.t.). Over 5,5 m.u.t. er der ikke observeret forhøjede tracerkoncentrationer i jordprøverne, hvorfor antallet af forgreninger til hovedsprækkerne vurderes at være begrænset over denne dybde. Fra 5,5-8 m.u.t. er der observeret signifikant forhøjede jordkoncentrationer, hvilket kunne indikere tættere forekomst af tyndere sprækker eller forgreninger til hovedsprækkerne i dette interval.

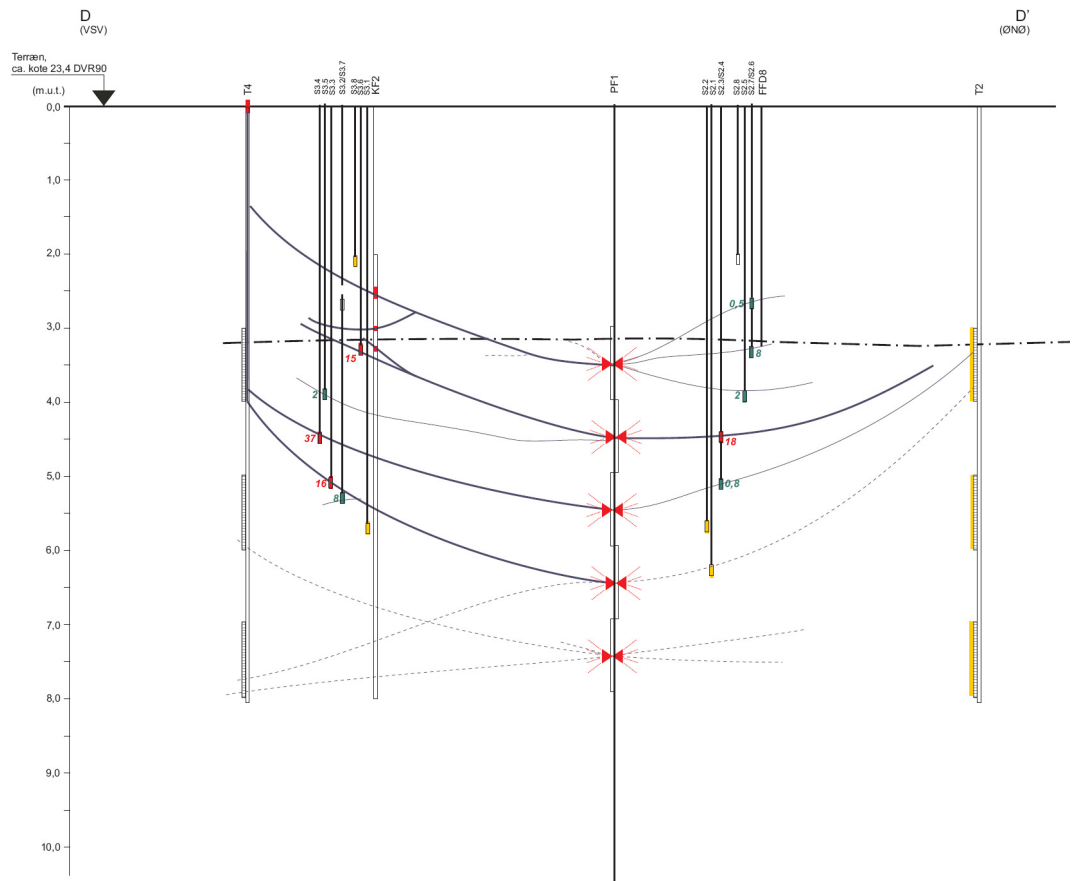
Dette er særlig udtalt i dybden 5,5-6 m.u.t., hvor der i M2 visuelt er observeret tæt, men ikke-kontinuert forekomst af tracer i hele intervallet, hvilket indikerer, at der her er skabt et egentligt sprækkenetværk snarere end distinkte sprækker.

Det vurderes umiddelbart mest sandsynligt, at de høje tracerkoncentrationer i vandprøverne fra de to nedre filtre i M2 afspejler koncentrationerne i sprækkerne og ikke udtrykker det generelle koncentrationsniveau i de filtersatte intervaller.

I den højre del af profilet (NØ-kvadrant) er der visuelt detekteret tracer i boring M5 og M6. Uden for de visuelle tracerforekomster i borerne M5 og M6 er der ikke detekteret tracer i signifikante koncentrationer i jordprøver. Der vurderes at være tre-fire distinkte sprækker NNØ for PF1 i intervallet 1,7-5 m.u.t. Under 5 meters dybde vurderes tracerudbredelsen at være begrænset, idet der ikke er konstateret signifikant forhøjede koncentrationer af tracer i jordprøverne fra M5. Idet datagrundlaget er begrænset i denne retning kan det dog ikke afvises, at der findes flere sekvenser med tracerforekomst end her beskrevet.

Profil D-D'

Profilsnit D-D' gennemskærer testfeltet fra VSV til ØNØ.



Figur 8.12 Profil D-D'. Det detaljerede profilsnit findes i bilag M.

I den venstre del af profilet (SV-kvadrant) er der detekteret tracer både visuelt i KF2 og ved udslip på terræn (T4), samt i sugecellerne S3. Der vurderes at være minimum fire distinkte sprækker, der trykafledes i T4 og undervejs gennemskærer hhv. sugecellerne (3,2 m, 4,4 m

og 5 m.u.t.) og KF2 (mellem 2,5-3,5 m.u.t.). Forhøjede koncentrationer i vandprøver fra S3-2 og S3-5 indikerer, at der omkring 4 m.u.t. og 5 m.u.t. forekommer tyndere sprækker eller forgreninger til hovedsprækkerne.

Der findes ikke data, der indikerer forekomst af tracer under 6 m.u.t. VSV for PF1, men trykobobservationer under fraktureringen peger på, at der også i de dybeste fraktureringsintervaller er sket trykaflastning i T4 i alle tre filtre. Hvorvidt eller i hvor høj grad tracerudbredelsen følger trykudbredelsen vides ikke, men datatætheden under 6 meters dybde i denne retning er sparsom (kun KF2 når dybere end 6 m).

I den højre del af profilet (NØ-kvadrant) er der detekteret tracer i én sugecelle og målt forhøjede tracerindhold i vandprøver fra fire andre sugeceller.

Der vurderes at være minimum én distinkt sprække, der gennemskærer sugecelle S2-4 ca. 4,5 m.u.t. Derudover indikerer de forhøjede koncentrationer i de øvrige fire sugeceller, at der er dannet yderligere et antal tyndere sprækker eller forgreninger i intervallet 2,5-5 m.u.t., der som minimum når ud i ca. 2 meters afstand fra PF1.

Der er påvist lave indhold af tracer i vandprøver fra alle tre filtre i T2, placeret 5 m fra PF1.

Trykobobservationer under fraktureringen indikerer, at der i fraktureringsintervallerne 6-7 og 5-6 m.u.t. er sket trykaflastning i det øverste filter i T2. Data, om end begrænset i denne retning, tyder ikke umiddelbart på, at tracerudbredelsen helt følger trykudbredelsen i dette tilfælde. Der foreligger således ikke data, der peger på en markant spredning af tracer under 5 m.u.t. ØNØ for PF1.

8.3.3 Typer af tracerforekomst

Ved genfindning af tracerne, er der observeret flere overordnet forskellige typer forekomst af tracer. De observerede hovedtyper beskrives i det følgende:

Distinkte sprækker

Både i kernerne og i jordprøverne fra lagfølgeboringerne er der observeret distinkte sprækker med kraftig lillafarvning, der observeres tydeligt under både dagslys og UV-lys. Omkring sprækken ses den ”upåvirkede” matrix, der i dagslys fremtræder hhv. brun eller grå, mens der under UV-lys ses en gulfarvning omkring sprækken, da uranine er diffunderet et par cm ind i matrix. Sprækkerne optræder alene eller flere ved siden af hinanden, men med en vertikal afstand mellem sprækkeforekomsterne på 0,5-2,5 m.

De distinkte sprækker ses i kernerne primært som nær-horisontale sprækker, i de fleste tilfælde skråtstillede.

I flere dybder i lagfølgeboringerne ses sprækkerne som sprækkeflader af f.eks. 10 cm's bredde. Sprækkefladerne er skråtstillede og drejer i nogle tilfælde næsten hele vejen rundt om boresneglen.

I boringerne ses flere steder distinkte vertikale, skråtstillede sprækker af ca. 10 cm's højde (f.eks. M1 2,5 m.u.t.).

"Diffus" tracerforekomst I boring M2 er der i dybden 6,5-7 m observeret en sekvens på ½ meter af tæt, men ikke-kontinuert forekomst af tracer, der er tydeligt lilla i dagslys. Det ser ud som om, at traceren er sprayet ud. Sekvensen er registreret i 3 meters afstand fra PF1 et par meter under redoxgrænsen, hvor den naturlige sprækketæthed forventes at være væsentligt reduceret i forhold til over redoxgrænsen.

Omtrent det samme gør sig gældende for KF3, hvor der i intervallet 6-6,45 m.u.t. er observeret en sekvens med diffus, men markant forekomst af tracer. KF3 er beliggende 1,6 m fra PF1.

Tætte distinkte sprækker I M3, der er placeret 0,75 m fra PF1, er der observeret en 2,6 m lang sekvens (2,4-5 m.u.t.) med tæt forekomst af kraftig lillafarvet tracer, der tydeligt kunne observeres i dagslys. I sekvensen ses både et stort antal tætliggende, distinkte sprækker og en mere diffus, ikke-kontinuert forekomst af tracer.

Udslip på terræn Under fraktureringen/ tracerinjektionerne blev der to steder uden for testfeltet observeret bobler af gullig tracer på terrænoverfladen; ved KF0 ca. 6,8 meter fra PF1 og ved obs. 2 ca. 10 meter fra PF1. Den efterfølgende udgravning omfattede disse to delområder. Ved selve udgravningen kunne der ikke observeres tracer i matrix under og omkring de to steder, hvor der var spredt tracer på terrænoverfladen. Det kan altså ikke visuelt registreres, hvordan tracerne er spredt hen til de to delområder. Udgravningen blev foretaget 1½ uge efter fraktureringen.

8.3.4 Hypoteser om sprækkedannelse

På baggrund af de ovenfor beskrevne observationer af tracerforekomst kan der opstilles en hypotese om, hvilke typer af sprækkedannelse, som den pneumatiske frakturering har forårsaget:

- Der er dannet en lang række distinkte sprækker over hele den frakturerede dybde ud til minimum 6,8 meters afstand fra PF1. Afstanden mellem sprækkerne varierer mellem 0,5-2,5 m til nogle steder kun at forekomme i en enkelt dybde.

- Observationer i M2 og KF3 6-7 m.u.t. indikerer, at der er sket en "diffus" spredning i matrix over et interval på ca. ½ meter, dvs. en jævn fordeling af tracer uden forekomst af distinkte sprækker.
- Observationer i M3 indikerer, at der nær PF1 (0,75 m) er skabt et tæt netværk af sprækker, minimum i dybden 2,4-5 m.u.t., i hvilket traceren er omtrent jævnt fordelt i matrix.
- Den manglende genfindning af tracere omkring udslipsstederne ved udgravningen kunne indikere, at der er dannet sprækker hen til udslipsstedet, der har transporteret synlige mængder tracer, men er så tynde, at de ikke visuelt kan registreres. Disse sprækker tilbageholder således ikke store mængder tracer i sig selv. Dog kan der være sket en afsætning af tracer i sidegrene til sprækken eller i mindre mængder i selve sprækken, som så efterfølgende er diffunderet ud i matrix. Disse "usynlige transportsprækker" kan være kunstigt skabte eller naturlige sprækker, der evt. er udvidet som følge af fraktureringen.

Naturlige og inducerede sprækker

De to sprækker med tracer, der er observeret i udgravningen (ca. 4,7 og 6,3 m fra PF1), er vurderet at være naturlige, hydraulisk aktive sprækker. De sprækker med tracer, der er observeret i kernerne, er derimod vurderet at være kunstigt inducerede sprækker.

De udslip på terræn, der er observeret i T1, T4 og KF0, vurderes at være forårsaget af, at en horisontal eller skrå sprække har ramt borehullet, der har fungeret som en vertikal trykaflastning.

Ved obs. 2 var der derimod ikke boret eller udført sonderinger forud for fraktureringen. Udslippet ved obs. 2 vurderes derfor at være sket ved, at en horisontal sprække har ramt nogle naturlige, vertikale sprækker, der har ledt tracer til terrænoverfladen.

8.3.5 Massebalance

På baggrund af de gennemførte analyser af jord fra M-boringer og vandprøver fra sugeceller og M-boringer er der opstillet en overordnet massebalance for uranine og rhodamine WT. Beregningerne er beskrevet i bilag T.

Vurderet ud fra jordprøverne kan følgende fremhæves:

- Af den injicerede masse af uranine kan der genfindes ca. 90 %, mens massen af rhodamine WT overestimeres med ca. 66 %.

- Mere end 90 % af massen genfindes inden for 1 meters afstand fra PF1 og resten fra 1-4 m. Vertikalt findes mere end 90 % af massen mellem 2 og 6 m u.t.
- Inden for 1 meters afstand fra PF1 er den opnåede gennemsnitskoncentration af uranine hhv. rhodamine WT estimeret til ca. 35 mg/kg hhv. 65 mg/kg. De teoretisk beregnede koncentrationer var hhv. 3-4 mg/kg for begge stoffer – men ud fra en forventning om jævn spredning ud til 4 m fra PF1. Forskellen mellem det faktisk påvirkede jordvolumen og det teoretiske er ca. 15 gange, hvilket stemmer overens med at de opnåede koncentrationer tilsvarende er ca. 15 gange større end forventet.
- Der findes, som vist i kerneprøver, en meget stor vertikal variation i koncentrationer, og det vurderes, at der er en risiko for overestimering af de anvendte gennemsnitskoncentrationer – og dermed af den samlede masse. Endvidere findes der inden for 1 meters afstand kun data fra en retning.
- De manglende jordkoncentrationer fra 0,75 til 3 m fra PF1 betyder, at det ikke kan afvises, at der er opnået en betydende spredning til mere end 1 m, men dog mindre end 4 meter. Således viser FFD-sonderingerne FFD5 og FFD4 placeret hhv. 1,5 m og 2,8 m fra PF1, tydelige respons i dybdeintervallet 3-8.

Ud fra vandprøverne kan følgende fremhæves:

- I modsætning til jordprøverne, udviser vandprøverne fra sugecellerne og 3 ud af 5 filtersatte M-boringer et relativt ensartet koncentrationsniveau - til trods for at de er placeret jævnt fra 1,5 til 4 m fra PF1. Gennemsnitskoncentrationen af uranine hhv. rhodamine WT er 10 mg/l hhv. 1 mg/l, og vurderes at være repræsentative for porevandets indhold i nogen afstand (1-10 cm) fra sprækkerne.
- Af den injicerede masse kan ca. 20 % af uranine og 3 % af rhodamine WT genfindes i vandfasen i selve matrixen, idet der antages en relativt jævn fordeling ud til 4 m fra PF1. Forskellen i genfinding af stofferne skyldes sandsynligvis en kraftigere sorption af rhodamine WT til jorden. Den relativt lave genfinding for vandprøver i forhold til jordprøver kan skyldes mangel på vandprøvedata inden for 1,5 m fra PF1.

- Kun ca. 5 % af massen genfindes inden for 1 m's afstand fra PF1 og de resterende 95 % findes fra 1-4 m. Vertikalt findes mere end 95 % af massen mellem 3 og 6 m u.t.

8.3.6 Samlet vurdering

Tendenser for sprække-udbredelse

På baggrund af de indsamlede data for genfinding af tracerne og de udarbejdede profilsnit ses følgende tendenser:

- Sprækkerne synes at søge opad mod terræn, enten fordi de udbredes i en skål-facon og/eller fordi inducerede horisontale sprækker rammer naturlige vertikale sprækker
- Der er genfundet høje koncentrationer af tracer i flest observationspunkter i dybdeintervallet 2,5-7 m.u.t. ud til 4 meter fra PF1.
- Det synes i højere grad muligt at opnå mindre afstand mellem sprækkerne tæt på PF1 (<1-2 m), hvor trykpåvirkningen er størst samt dybere i formationen (under redoxgrænsen), hvor antallet af naturlige sprækker er aftaget.
- I større afstand fra PF1 (>1-2 m) og i de øvre jordlag (over redoxgrænsen) synes det naturlige sprækkesystem at have stor indflydelse på spredningen af tracer.

Apertur

På baggrund af de udførte diffusionsberegninger, bilag G, skønnes groft en gennemsnitlig sprækkeapertur på <0,1-0,3 mm. Dette er inden for samme størrelsesorden som aperturen af naturlige sprækker.

Datatæthed i fht. retning

Datatætheden varierer en del som funktion af retningen væk fra PF1. Således er der langt flere data vest for PF1 end øst for PF1. Den største datatæthed findes i NV-kvadranten, mens den mindste datatæthed findes i SØ-kvadranten.

Tracerudbredelse i fht. retning

Der er visuelt observeret tracer i alle retninger fra PF1. Trods forskellen i datatæthed, synes der dog fortsat at være en tendens til, at tracerudbredelsen er mere markant mod vest end mod øst. For de øverste tre fraktureringsintervaller kan dette kan være foranlediget af, eller i hvert fald forstærket af, at forseglingen i borerne T1 og T4 kollapsede efter den anden frakturering. Den mængde tracer, der skød op ved boring T1, forøgedes gradvist for hver tracerinjektion i de sidste tre intervaller. Dette indikerer, at der indledningsvist ved boringskollapset blev skabt en præferentiel spredningsvej, som gradvist blev udvidet efterhånden som flere injektioner blev gennemført.

Der ses ikke umiddelbart en klar tendens til, at tracerudbredelsen følger trykudbredelsen under fraktureringen. Dette kan være forstærket

af, at fraktureringen og tracerinjektionen i de første tre intervaller blev foretaget i to separate trin, hvilket kan have medført at en del af det sprækkenetværk, der blev skabt under fraktureringen, havde lukket sig forud for tracerinjektionen, hvorved en del af de inducerede sprækker ikke blev udnyttet til fordeling af tracer.

Massebalance og influens-
radius

Massebalancen, udført på baggrund af de udførte jordanalyser, indikerer, at 90 % af den injicerede tracermængde er fordelt inden for 1 m fra PF1, mens de resterende 10 % findes fra 1-4 m fra PF1. Pga. manglende data mellem 0,75-2,5 m fra PF1 er der en vis usikkerhed forbundet med dette estimat. Det vurderes umiddelbart at koncentrationniveauet tæt på PF1 kan være overestimeret, og at den intensive fordeling af tracer muligvis kan være sket ud til 2 m fra PF1.

9 Konklusion

Sammenfatning af pilotforsøg	Der er udført et pilotforsøg med pneumatisk frakturering fra en enkelt boring med frakturering og tracerinjektion for hver meter fra 3-8 m.u.t. Pilotforsøget har omfattet efterfølgende undersøgelser i felt og laboratorium med henblik på genfinding af de injicerede tracere.
Dokumentationsmetoder	<p>Det vurderes, at fotografering af kerner under UV-lys, fluorescensanalyser af delprøve af kerner, jordprøver (feltobservationer), fluorescensanalyser af jordprøver samt vandprøver fra sugeceller har været de bedst egnede og mest anvendelige dokumentationsmetoder ved fraktureringen på Vadsbyvej.</p> <p>De mest anvendelige dokumentationsmetoder supplerer hinanden med hensyn til skala og detektionsgrænser.</p> <p>Uranine har vist sig velegnet til fotodokumentation under UV-lys. Rhodamine WT vurderes velegnet som supplement til uranine i forbindelse med fotodokumentation, om end uranine dominerer under UV-lys. Bromid, uranine og rhodamine WT supplerer hinanden godt ved en kombination af fotodokumentation og analyser på jordprøver, kerneprøver og vandprøver. Optisk hvidt kan være et godt supplement såfremt der etableres dokumentation for stoffets respons i forhold til den anvendte detektor.</p> <p>Det vurderes ikke, at registrering af jordhævninger under og efter fraktureringen giver information om tracerudbredelsen eller at disse data kan korreleres til sprækkeapertur. Hævningsdata vil dog have relevans til vurdering af risiko for påvirkning af bygninger eller ledninger i nærområdet.</p>
Inducerede sprækker	<p>Pilotforsøget har vist, at det med pneumatisk frakturering er muligt at sprede stof (tracer) op til 6,8 m væk fra fraktureringsboringen via distinkte sprækker. Spredningen af tracer via distinkte sprækker er sket i forskellige dybder mellem 1,7-9 m.u.t. i alle retninger væk fra fraktureringsboringen, dog i de øvre fraktureringsintervaller fortrinsvist i vestlig retning pga. kollaps af forseglingen i to borer. De distinkte sprækker optræder med en indbyrdes afstand på 0,5-2,5 m.</p> <p>Tæt på fraktureringsboringen (0,75 m) samt i større afstand (1,5-3 m fra PF1) i dybden 6-7 m.u.t. er der visuelt observeret en mere jævn fordeling af tracer i matrix i form af tætliggende sprækker eller ikke-kontinuerte forekomster af tracer.</p>

Analysen af jordprøver viser, at tracer er spredt ud i dele af formationen, hvor der ikke visuelt kan detekteres tracer eller sprækker.

Massebalance og influensradius

En massebalance for tracerne uranine og rhodamine WT viser, at 90 % af massen er fundet inden for 1 m fra PF1, mens de resterende 10 % af tracermassen findes i 1-4 meters afstand fra PF1. Pga. den manglende tæthed mellem sprækker er der således ikke så stor en masse knyttet til de observerede enkeltstående distinkte sprækker.

Idet der ikke findes data fra jordanalyser mellem 0,75 og 2,5 m fra PF1, er der i massebalancen forbundet nogen usikkerhed med fastsættelsen af den afstand, inden for hvilken den største masse findes.

På baggrund af observationerne og den udførte massebalance vurderes der ved pilotforsøget opnået en influensradius på 1-2 meter, inden for hvilken der er opnået en relativt jævn spredning af det injicerede stof.

Anvendelighed af pneumatisk frakturering

Det vurderes på baggrund af pilotforsøget, at pneumatisk frakturering har et potentiale til at forbedre fordelingen af stof i en morænelersformation med henblik på oprensning ved in situ massefjernelse.

I de dele af formationen, hvor der forekommer mange naturlige sprækker, dvs. fortrinsvist i de øverste 3 meter, kan det være svært at kontrollere sprækkedannelsen. Muligheden for at frakturere i dette interval er dog ikke undersøgt i det udførte pilotforsøg.

10 Perspektivering og anbefalinger

10.1 DOKUMENTATIONSDESIGN

De anvendte dokumentationsmetoder supplerer hinanden med hensyn til både detektionsgrænse og skala.

Visuelle metoder

Til at skelne sprækker med høje koncentrationer af tracer, har fotografering af kerneprøver under UV-lys samt feltobservationer af jordprøver under borearbejde været velegnede. Ved begge metoder fremstår sprækkerne tydeligt i forhold til den omgivende lermatrix. Afhængig af borediameteren, dækker jordprøverne et større areal og kan derfor potentielt medtage flere sprækker end kernerne, ligesom skråstillede sprækker, der evt. ændrer orientering mere sandsynligt fremtræder i en boring. Omvendt viser kernerne et uberørt udsnit af lermatrix, hvorved denne metode giver et indtryk af sprækkeaperturen og den indbyrdes sprækkeafstand. Herved kan det hurtigt ses, hvor områderne med de høje koncentrationer er, og udtagningen af delprøver til analyse kan udføres med et indledende kendskab til koncentrationsniveauet.

Jordanalyser

De visuelle metoder giver således et klart indtryk af, hvor der findes sprækker med høje koncentrationer af tracer. Imidlertid kan der forekomme områder i lermatrix med signifikante koncentrationer, som ikke er visuelt detekterbare. Dvs. at områder, hvor tracer enten er diffunderet ind i matrix eller spredt via tynde sprækker med lavere koncentrationer end visuelt detekterbart kan ikke udpeges ved de visuelle metoder. Sådanne områder kan derimod identificeres vha. analyse af jordprøver, enten fra boringer eller fra kerneprøver. Kvantifikationsgrænsen for jordanalyser er ca. en faktor 10 lavere end den visuelle kvantifikationsgrænse. Idet tracerne i dette koncentrationsinterval som nævnt ikke er synlige, er det ikke muligt at skelne, hvordan traceren er spredt derind, dvs. selve sprækkestrukturen kan alene erkendes i de synlige koncentrationsniveauer.

Vandanalyser

Analyser af vandprøver giver information om koncentrationsniveauet i jorden omkring filteret. Vandanalyserne har en meget lav detektionsgrænse for uranine og rhodamine, hvilket muliggør detektion af et stort spænd af koncentrationer – fra helt lave koncentrationer til visuelt detekterbare koncentrationer. Imidlertid er det ved udtagning af vandprøver ikke muligt præcist at korrelere resultaterne med evt. forekomst af synlige sprækker, da filtrene installeres uden eller med begrænset kendskab til sprækkerne i jorden. Dette er særlig udtalt for vandprøvetagning fra sugeceller, der presses ned i jorden uden forud-

gående udtagning af jordprøver. Ved etablering af filtersatte borer kan der ske en korrelation med de visuelle observationer i jordprøverne under borearbejdet, men filterlængden bevirker, at filtrene integrerer vand fra et større volumen jord og formentlig derfor både får vand fra sprækker og fra matrix. Ved niveauspecifik filtersætning i lagfølgeboringer er det essentielt at borerne udføres med foring. Sugeceller vurderes dog klart bedst at afspejle koncentrationsniveauet præcist omkring filtersætningen, idet risikoen for krydskontaminering er minimal.

Dokumentation af sprækkestruktur

Det valgte dokumentationsdesign har således, via en lang række datapunkter, givet informationer om, i hvilke dybder, retninger og afstande fra fraktureringsboringen, der er spredt tracer. De visuelle observationer har givet indikationer af sprækkeapertur samt afstand mellem sprækker og mellem sprækkezoner, mens det samlede datasæt har givet informationer om tracerudbredelsen horisontalt og vertikalt.

Selve sprækkestrukturen er ikke kortlagt i detaljer, dels da datasættet hovedsageligt består af en lang række enkeltstående datapunkter, dels da kun sprækker med høje koncentrationer kan registreres visuelt. Der er således ikke opnået et samlet billede af samspillet mellem kunstigt skabte sprækker og naturligt forekommende sprækker.

De ovenfor beskrevne metoder vurderes som nævnt i konklusionen at være de bedst egnede og mest anvendelige til beskrivelse af tracerudbredelsen som følge af pneumatisk frakturering.

Dokumentationsmetoder ved fuldskala

Det er dog ikke alle metoder, der kan overføres til en fuld-skala-implementering af pneumatisk frakturering, idet nogle af metoderne er rettet specifikt mod genfindning af de injicerede tracere, hvor det ved en fuld-skala-implementering vil være nogle andre metoder, der er relevante, afhængig af den valgte oprensningss metode.

Vælges en metode som stimuleret reduktiv dechlorering bemærkes det, at aktiviteten af de dechlorerende bakterier ophører ved tilstedeværelse af høje koncentrationer af de anvendte tracere [13]. Det kan derfor ikke anbefales at injicere tracere sammen med substratet (og evt. bakterierne), hvorfor dokumentationsdesignet må tilrettelægges herefter. Ydermere skal det bemærkes, at sugeceller ikke er egnede til at udtage vandprøver til bakterielle analyser, da porestørrelsen i sugecellen er for lille til at bakterierne kan passere.

10.2 PNEUMATISK FRAKTURERING

Som nævnt vurderes pneumatisk frakturering at have et potentiale til forbedring af fordelingen af stof i forbindelse med in situ oprensning

af forurening i moræner. Den tætteste fordeling fås, ikke overraskende, tæt på fraktureringsboringen.

Det vurderes, at lokalkendskab hos operatøren til geologi og andre relevante forhold er kritisk, således at opbygning af danske erfaringer vil kunne forbedre resultaterne generelt.

Konkrete forslag til forbedringer

Ud fra de erfaringer udførelsen af pilotforsøget har bibragt, vurderes der konkret at være følgende muligheder for teknisk at optimere den pneumatiske frakturering:

- Fraktureringen kan udføres fra kortere fraktureringsintervaller, f.eks. ½ meter frem for de anvendte 1 meter intervaller, hvilket forventes at øge sprækketætheden.
- Der kan injiceres større volumen væske, hvilket forventes at forbedre fordelingen af stof tæt på fraktureringsboringen samt medføre en øget influensradius af det område, i hvilket der er en jævn fordeling af stof.
- Frakturering og stofinjektion kan udføres i ét trin, såfremt der ikke skal indsamles trykudbredelsesdata fra testboringer. Dette vil formentlig forhindre sprækkerne i at lukke til inden stoffet injiceres i sprækkerne.
- Efterladte borehuller og evt. testboringer ved fuldskala-implementering bør afproppes med cement frem for bentonit.

Interaktion med naturlige sprækker

En af udfordringerne ved pneumatisk frakturering er at kontrollere sprækkedannelsen og stoffordelingen i den øverste del af lagfølgen, hvor antallet af naturlige sprækker er størst.

I disse niveauer (øverste 3 meter) kunne det derfor være en fordel at injicere uden forudgående frakturering og på den måde benytte det eksisterende sprækkesystem til fordeling af stof i matrix. Hvorvidt injektionen kan foregå som en LAI-proces (dvs. med påtrykt gasflow) eller som en simpel pumpning i et forseglet interval må afgøres af de lokale geologiske forhold.

Samme problematik gør sig gældende for den beslægtede metode hydraulisk frakturering, hvor udbredelsen af sprækker ligeledes påvirkes af geologiske heterogeniteter /12/.

Pneumatisk vs. hydraulisk frakturering

Ved hydraulisk frakturering kan der skabes enkeltstående, op til 1-2 cm tykke, sandfyldte sprækker med ca. 0,5-1 meters vertikal afstand /3/.

Ved pneumatisk frakturering kan der skabes et større antal tynde (0,1-1 mm) sprækker. Det er muligt at blæse sand eller andre faste materialer ind i sprækkerne under fraktureringen /14/, men dette er dog ikke undersøgt i nærværende pilotforsøg. Der er i det udførte pilotforsøg fraktureret med 1 meters vertikal afstand, hvilket tæt på boringen har skabt flere sprækker pr. fraktureringsinterval. Det er ifølge ARS Technologies teknisk muligt med tilpasset udstyr at frakturere med kortere vertikale intervaller, f.eks. ½ meter, hvilket må formodes at give et større antal sprækker med deraf følgende mindre indbyrdes afstand.

Pneumatisk frakturering har et væsentligt større potentiale til at imødegå diffusionsbegrænsningerne, da sprækketætheden kan blive væsentlig større end ved hydraulisk frakturering, specielt hvis fraktureringsintervallerne reduceres. Pneumatisk frakturering som metode til forøgelse af formationens permeabilitet er ikke vurderet i forbindelse med det udførte pilotforsøg.

Potentielle oprensningsmetoder med pneumatisk frakturering

Oprensning ved in situ massefjernelse af lerjorde vha. pneumatisk frakturering kan eksempelvis udføres vha.:

- stimuleret reduktiv dechlorering
- kemisk oxidation
- nulvalent jern
- Endvidere kan pneumatisk frakturering potentielt anvendes til forøgelse af jordens permeabilitet med henblik på vakuumeks-traktion, hydraulisk fiksering, dual phase extraction etc. Anvendeligheden af pneumatisk frakturering til disse formål er dog ikke vurderet specifikt ved nærværende pilotforsøg.

10.3 SUPPLERENDE DOKUMENTATION

Det anbefales at indsamle supplerende dokumentation inden for en radius af 2 m fra PF1 til uddybning af massebalancen ved afklaring af influensradius for en jævn fordeling af stof i matrix. Det anbefales, at de supplerende undersøgelser omfatter udtagning af et antal kerneprøver til fotografering i laboratoriet og udtagning af jordprøver til analyse på fluorometer for hver ½ meter. Idet det er 3½ måned siden tracerblandingen blev injiceret, vides det ikke, om tracerne fortsat fluorescerer under UV-belysning, og hvor kraftigt responset i givet fald er. Men da stofferne ikke nedbrydes i selve formationen, vil de fortsat kunne registreres ved analyse af jordprøverne, i fald de findes i matrix.

De supplerende undersøgelser udføres i april og maj 2006 og afreporteres i særskilt notat.

11 Referencer

- /1/ Københavns Amt. Indledende forureningsundersøgelse. Tidligere kemikaliefordelingscentral, Vadsbyvej 16A, 2640 Hedehusene. Januar 2005. Udarbejdet af Hedeselskabet.
- /2/ Københavns Amt. Vasbyvej 16A, Taastrup. Omfattende forureningsundersøgelse. Marts 2006. Udarbejdet af Carl Bro.
- /3/ Christiansen, C. & J.S.A. Wood: Environmental Fracturing in Clay Till Deposits. Master Thesis. Institute of Environment & Resources. Technical University of Denmark. January 2006.
- /4/ ARS Technologies Inc. Report of results. Pneumatic Fracturing Substrate Injection Pilot Study. Glostrup Site and Hedehusene Site, Denmark. December 2005
- /5/ United States Patent. Schuring et al. Method and apparatus eliminating non-naturally occurring subsurface, liquid toxic contaminants from soil. Patent no. 5,032,042. Date of patent: Jul.16, 1991.
- /6/ www.arstechnologies.com
- /7/ J.R. Schuring. Fracturing technologies to enhance remediation. Technology evaluation report. Prepared for Ground-Water Remediation Technologies Analysis Center. April 2002
- /8/ J.R. Schuring. Pneumatic Fracturing of Low Permeability Media. Remediation of DNAPL in Low Permeability Media Project. Sponsored by US DOE & API. Focus Paper. August 1996
- /9/ John Haas, ARA Vertek, Pers. Comm.
- /10/ Markesic, S.J., 2000. Field Performance assessment of pneumatic fracturing for permeability enhancement of clay deposits. Masters Thesis in Earth Science. University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada.
- /11/ Miljøstyrelsen. Frakturering. Inducerede sprækker ved hydraulisk og pneumatisk frakturering. Miljøprojekt nr. 541, 2000. Udarbejdet af B. Nilsson, C. Gormsen, B. Blem, B. Slack og L. Murdoch.

- /12/ Miljøstyrelsen og Vestsjællands Amt. Frakturer fra lodrette testboringer på Vestergade 10, Haslev. Teknologiudviklingsprojekt 2004. Udarbejdet af NIRAS Rådgivende ingeniører og planlæggere A/S. Under udgivelse.
- /13/ C. Scheutz. Undersøgelse af toksiciteten af farvestofferne uranine og rhodamine WT samt bromid på bakterier af typen *Dehalococcoides*. Bilag til Rapport: Københavns Amt. Pneumatisk frakturering og Stimuleret reduktiv dechlorering. Dokumentation af pilotforsøg. Glostrup Regnvandsbassin, Industrivej 3, Glostrup. Udarbejdet af NIRAS Rådgivende ingeniører og planlæggere A/S og Institut for Miljø & Ressourcer, DTU. Under udarbejdelse.
- /14/ John Liskowitz, ARS Technologies Inc. Pers.comm., December 2005.
- /15/ Steenfeldt, J.S. og Foged, N. 1992. Clay Till Strength - SHANSEP and CSSM. Proc. NGM-92, Aalborg. Danish Geotechnical Society, Bulletin 9 Vol. 1, 81-86.
- /16/ Foged, N. 1994. An overview on engineering geological conditions at Storebælt. Prox. XI ECSMFE, Copenhagen '95.
- /17/ C. Westergaard, M. Broholm, T.H. Jørgensen og P. Rasmussen. Stimuleret in situ reduktiv dechlorering af TCE i moræner. Feltforsøg med hydraulisk frakturering. ATV Vintermøde om Jord og grundvandsforurening. Vingstedcentret. 7.-8. marts 2006.
- /18/ K.E. Klint. Karakterisering og forureningstransport i moræner. ATV Vintermøde om Jord og grundvandsforurening. Vingstedcentret. 7.-8. marts 2006.

12 Bilag

A	Oversigt over feltarbejde
B	Situationsplan med placering af undersøgelsespunkter
C	Pneumatisk frakturering – dokumentationsmetoder. FFD-sonde og indledende fotografering.
D	Pneumatisk frakturering – dokumentationsmetoder. Fotografering.
E	Pneumatisk frakturering – dokumentationsmetoder. Analyse af fluorescerende sporstoffer i vandprøver.
F	Pneumatisk frakturering – dokumentationsmetoder. Analyse af fluorescerende sporstoffer i jordprøver.
G	Diffusionsberegninger.
H	Beregning af tracermængder og –koncentration
I	Dokumentation vha. fluorescerende tracere. Håndtering af kerneprøver i laboratorium.
J	Resultater af FFD-sonderinger
K	Pneumatisk frakturering – Datarapport fra ARS Technologies
L	Jordhævnings- og nivellementsdata
M	Profilsnit med fluorescensrespons
N	Data vedr. tracere
O	Borejournaler
P	Vandprøvetagningsskemaer
Q	Analyseresultater vandprøver
R	Analyseresultater jordprøver
S	Geotekniske data
T	Massebalance